



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

다양한 시추궤도에서의 유성이수
유정 제어 모델링

Well Control Modeling of Oil Based Muds for
Various Well Trajectories

2013년 8월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
이 태 엽

다양한 시추궤도에서의 유성이수
유정 제어 모델링

Well Control Modeling of Oil Based Muds for
Various Well Trajectories

지도교수 최 중 근
이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2013년 8월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
이 태 엽

이태엽의 석사학위논문을 인준함
2013년 8월

위 원 장 박 형 동 (인)

부 위 원 장 최 중 근 (인)

위 원 송 재 준 (인)

초 록

킵(kick)이란 의도하지 않은 상황에서 지층의 유체가 유정으로 유입되는 현상이다. 이러한 킵의 발생을 방지하고 유입된 킵을 빠르게 감지하고 제어하여 안전하게 제거하는 과정을 유정제어(well control)라 한다. 유성이수에서 킵이 발생하면 주어진 온도, 압력에서 킵의 용해도에 따라 이수의 밀도와 부피가 변화하므로 안전한 유정제어를 위해 정확한 거동분석이 필요하다.

본 연구에서는 킵과 이수의 혼합구간은 이상으로 나머지구간은 단상으로 모델링하는 대체이상모델을 이용하여 유성이수에 대한 유정제어 모델링을 수행하였다. 개발된 유정제어모델을 이수종류, 시추궤도, 지층조건, 유정제어방법, 열전달 효과, 기저유 종류, 초크조작방법의 변화에 따른 다양한 유정제어상황에 적용하여 그 특징을 분석하였다.

유성이수의 경우 유입된 가스킵이 이수에 녹으므로 이수부피증가가 낮아 수성이수에 비해 킵감지가 늦다. 이러한 현상은 시추궤도의 수평구간이 길어질수록 더욱 두드러진다. 지층의 유체투과율이 높을수록 유입되는 가스킵의 양이 많아 그 결과 이수속에 용해된 가스킵이 방출되는 유정깊이는 더 깊어진다. 유성이수를 구성하는 기저유에 가벼운 탄소성분이 많을수록 가스와의 혼합성이 높아 더 높은 용해도 값을 가진다. 따라서 기저유 조성은 시간에 따른 이수부피증가에 영향을 미친다. 본 연구에서는 요구되는 일정한 공저압력을 유지하는 자동초크제어와 사용자에게 의한 수동초크제어를 모델링 하였다. 이를 통해 시추공 내의 실제적인 킵의 거동을 파악할 수 있으며 향후 교육·훈련용 유정제어시스템의 분석모듈로 적용될 수 있다.

주요어: 유성이수, 유정제어, 킵, 방향성시추궤도, 가스킵 용해도

학 번: 2011-23426

목 차

초록	i
List of Tables	iv
List of Figures	v
제 1장 서론	1
제 2장 이론적 배경	5
2.1 지배방정식	5
2.2 PVT 모델	7
2.3 용해도 모델	10
2.4 키크윅 모델	11
2.5 시추공 온도분포 모델	12
2.6 시추공 궤도 모델	14
2.7 가스상승속도 모델	15
2.8 이상마찰손실 모델	18
제 3장 유성이수 유정제어 모델링	20
3.1 유정제어모델	20
3.2 모델링 알고리즘	21
3.3 유정제어모델 검증	23
제 4장 연구결과	26
4.1 입력자료	26
4.2 이수종류에 따른 유정제어분석	28
4.3 시추궤도에 따른 유정제어분석	30
4.4 지층조건에 따른 유정제어분석	33
4.5 유정제어방법에 따른 유정제어분석	35

4.6 열교환 고려에 따른 유정 제어분석	37
4.7 기저유종류에 따른 유정 제어분석	39
4.8 초크조작방식에 따른 유정 제어분석	41
제 5장 결론	43
참고문헌	44
ABSTRACT	47

List of Tables

Table 1.1 Advantages of oil based mud over water based mud	2
Table 2.1 Base oil compositions and critical properties	9
Table 3.1 Input data for verification of developed model	23
Table 4.1 Default input data	26

List of Figures

Fig. 1.1 Shale swelling due to water absorption	2
Fig. 2.1 Gas solubility curve used in this study	10
Fig. 2.2 Schematic image of gas kick inflow	11
Fig. 2.3 Heat transfer in the wellbore	12
Fig. 2.4 Wellbore trajectory example	14
Fig. 3.1 Well control model	20
Fig. 3.2 Modeling algorithm of kick influx and kick removal	21
Fig. 3.3 Pit gain comparison with a commercial model: WBM	24
Fig. 3.4 Choke pressure comparison with a commercial model: WBM	24
Fig. 3.5 Pit gain comparison with a commercial model: OBM	25
Fig. 3.6 Choke pressure comparison with a commercial model: OBM	25
Fig. 4.1 Three well trajectories used in this study	27
Fig. 4.2 Pit gains for OBM and WBM	29
Fig. 4.3 Choke pressures for OBM and WBM	29
Fig. 4.4 Pit gains for the three trajectory types: WBM	31
Fig. 4.5 Choke pressures for the three trajectory types: WBM	31
Fig. 4.6 Pit gains for the three trajectory types: OBM	32
Fig. 4.7 Choke pressures for the three trajectory types: OBM	32
Fig. 4.8 Pit gains for different formation permeabilities: OBM	34
Fig. 4.9 Choke pressures for different formation permeabilities: OBM	34
Fig. 4.10 Pit gains for driller's and engineer's methods: OBM	36
Fig. 4.11 Choke pressures for driller's and engineer's methods: OBM	36
Fig. 4.12 Temperature profiles in the annulus	38
Fig. 4.13 Pit gains for different temperature profiles	38
Fig. 4.14 Gas solubility curves for the different base oils	40
Fig. 4.15 Pit gains for the different base oils	40
Fig. 4.16 Pit gains for automatic and manual choke control methods: OBM	42
Fig. 4.17 Choke pressures for automatic and manual choke control methods: OBM	42

제 1장 서론

전 세계적인 에너지 수요증가와 고유가의 지속은 유·가스전 개발을 위한 활발한 시추활동을 야기한다. 특히 개발하기 쉬운 원유(easy oil)의 고갈로 인해 최근의 시추는 육상보다는 해상에서 수직정보다는 방향정 및 수평정으로 그리고 고온고압환경에서 주로 이루어지고 있다. 시추의 목적은 정해진 예산 내에서 계획된 시추공의 크기로 목표심도에 도달하는 것이며, 성공적인 시추를 위해서는 유정제어(well control)가 반드시 필요하다. 유정제어란 광의의 의미에서 시추, 유정완결, 생산의 전 과정에 있어 필요한 유정의 압력과 안정성을 확보하여 계획된 작업을 성공적으로 수행하기 위한 제반행위를 통칭한다. 협의적인 의미에서 본다면 의도하지 않은 상황에서 유체가 지층으로부터 유입되는 현상인 킁(kick)을 방지하며 킁이 유입된 경우 빠르게 감지하고 제어하여 안전하게 제거하는 과정을 말한다(Choe, 2011).

시추작업에 사용되는 이수는 크게 수성이수(water based mud)와 유성이수(oil based mud)로 구분할 수 있다. 수성이수는 물을 기반으로 여러 가지 첨가물이 혼합되어 있으며 유성이수에 비해 가격이 싸고 사용후 처리가 쉽다. 유성이수는 주된 구성성분이 오일상인 기저유(base oil)이므로 수성이수에 비해 윤활성이 높아 시추과정 중 가해지는 토크가 낮고 장비의 부식이 방지된다. 또한 높은 온도안정성으로 인해 고온고압환경에서 시추하거나 물과의 반응성으로 문제가 되는 셰일층(Fig. 1.1)이나 물에 용해성이 높은 암염층 시추시에 사용될 수 있다. 이외에도 수성이수에 비해 유성이수가 갖는 장점은 Table 1.1과 같다.

하지만 유성이수를 사용 시 가스킁이 발생하면 유입된 가스가 유성이수에 용해되기 때문에 수성이수에 비해 이수부피의 증가 속도가 느려 킁감지가 지연된다. 이렇게 용해되어 있던 가스는 기포점압력보다 낮은 압력에서 빠져나와 갑작스럽게 팽창하므로 작업자가 대응할 시간이 짧아 때로는 유정폭발로 이어질 수 있다. 또한 유성이수는 온도, 압력, 조성에 따라 그 물성이 달라지므로 정확한 모델링을 통해 물성변화를 파악하여야 한다.

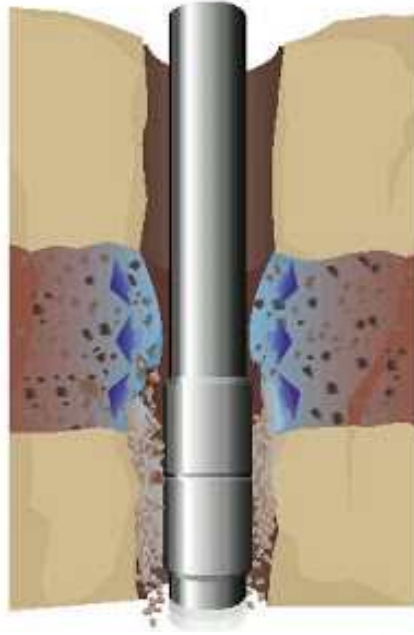


Fig. 1.1 Shale swelling due to water absorption

Table 1.1 Advantages of oil based mud over
water based mud
(Guntis, 2011)

High rate of penetration
Long bit life
Excellent shale inhibition
Thermally stable
Low reservoir damage
High lubricity, low torque
Low corrosion
Gauge hole
Low fluid loss
Reduced chance of stuck pipe
High solids tolerance
Salt not dissolved
Good coring fluid

시추작업에서 유정제어의 중요성으로 인하여 유정제어 모델링에 관한 많은 연구들이 진행되었지만 각각의 한계점들이 있다.

Nickens(1987)는 유정을 여러 개의 격자로 나누고 격자 내의 이수, 자유가스의 질량 및 운동량 보존방정식을 이용하여 킥과 이수의 이상(2-phase)유동을 모델링하였다. Nickens는 펌프유량, 지층조건, 유정제어방법 등을 변화시키며 다양한 유정제어 상황을 분석하였지만 유정의 기하변화 및 유성이수를 고려하지 않았다.

Rommetveit와 Blyberg(1989)는 이수, 자유가스, 용해가스의 질량 및 운동량 보존방정식을 이용하여 유성이수 유정제어상황을 모델링하였다. 그러나 이들은 유성이수를 구성하는 기저유의 조성을 고려하지 않았다. 또한 가스킥의 용해도를 계산하기 위해 제한된 압력범위에서 수행된 실험결과를 외삽하여 사용하였으므로 압력이 높은조건에서는 결과의 신뢰도가 낮다.

기존의 이상유동모델은 수치해의 발산 및 감쇄 문제와 같은 문제점들이 발생하여 이를 개선하고자 가스킥과 이수가 각각의 단상의 성질을 가지면서 완전히 섞여 있는 혼합체를 가정한 대체이상모델이 제시되었다(Choe and Juvkam-Wold, 1997; Choe, 2001). 이 모델은 계산이 용이하고 이상유동모델에서 나타나는 수치해의 문제점들을 극복하였으며 기존모델과 비교하여 그 오차가 대부분 (\pm)5.5% 이내로 나타난다. Choe 등(2004)은 동일한 모델을 사용하여 장거리(extended reach)타입, 수평타입의 시추궤도에서 유정제어 모델링을 수행하였지만 이 모델은 수성이수만을 고려하였으며 유정 내 온도구배를 일정하다고 가정하였다.

Peterson 등(2008)은 다양한 킥유체(dry gas, wet gas, volatile oil, black oil)의 유입을 가정하여 유성이수와 수성이수를 이용한 유정제어 모델링을 수행하였다. 유정제어의 결과로 각 유입유체에 대해 시간에 따른 이수부피증가와 지상의 초크압력변화를 제시하였다. 하지만 일정부피의 유체가 시추공에 유입되어있다고 가정하여 실제 시추과정에서 발생하는 킥유입현상을 모사하지 못하였고 시추궤도를 수직정에 한정하였다.

Sung(2012)은 가스킵의 존재와 이수의 종류에 따라 애눌러스를 다섯 개의 구간으로 나누고 유성이수 유정제어 모델링을 수행하였다. Peng-Robinson 상태방정식을 사용하여 온도와 압력에 따라 각 구간의 물성을 계산하였지만 지층조건에 따른 킵 유입 현상을 모사하지 못하였다. 또한 가스와 이수의 혼합구간이 하나만 존재한다고 가정하고 구간의 평균 물성치를 계산하였으므로 정확도가 떨어진다.

따라서 본 연구에서는 수치해석적 안정성이 있는 Choe와 Juvkam-Wold의 대체이상모델을 기반으로 모델링을 수행하여 유성이수 유정제어모델을 개발하고자 한다. 정확한 모델링을 위해 온도, 압력 및 유성이수의 조성에 따른 가스킵의 용해도를 구하여 모델링의 입력자료로 활용하고 Peng-Robinson 상태방정식을 통해 유성이수와 가스킵의 물성변화를 예측한다. 유정제어과정에서 이수의 열전달 효과를 고려하여 정확한 시추공온도분포를 고려한다. 개발된 모델을 다양한 지층조건 및 시추공 궤도, 사용자가 설정한 운영조건 등에 적용하여 각 상황별 유정제어특징을 분석하고자 한다.

이 논문은 총 5장으로 구성된다. 1장 서론에서는 유정제어의 중요성과 기존연구의 한계점에 대해 언급한다. 2장에서는 유성이수 유정제어 모델링을 수행하기위해 사용한 모델들에 대해 설명한다. 3장에서는 유성이수 유정제어모델링의 구성과 구체적인 계산 알고리즘에 대해 설명한다. 또한 개발된 모델과 상용프로그램의 결과를 비교함으로써 유성이수 유정제어모델을 검증한다. 4장에서는 개발된 모델을 이용한 다양한 유정제어상황에서 유정제어결과를 분석한다. 5장에서는 본 연구의 결론을 요약한다.

제 2장 이론적 배경

2.1 지배방정식

유정제어의 기본원리는 시추공저의 압력을 지층의 압력보다 최소한 같거나 높게 유지하는 것이다. 순환하는 이수에 의해 가해지는 시추공저압력은 식 (2-1)와 같이 구성된다.

$$FBHP = \Delta p_{hy} + \Delta p_f + \Delta p_{acc} + \Delta p_{chk} + \Delta p_{swab} - \Delta p_{surge} \quad (2-1)$$

여기서, Δp_{hy} 는 시추공을 채우고 있는 유체에 의한 정수압, Δp_f 는 유체의 유동방향과 반대로 작용하는 마찰압력, Δp_{acc} 는 유체의 유속변화에 의한 가속압력, Δp_{chk} 는 유체가 좁은 직경의 초크라인을 통과하면서 발생하는 마찰압력, Δp_{swab} 와 Δp_{surge} 는 시추공 내의 파이프 움직임에 따라 발생하는 압력이다.

만약 시추과정에서 지층의 압력이 시추공저압력보다 높아져 지층으로부터 가스킵이 유입된다면 빠르게 감지하여 유정을 폐쇄하고 이수를 순환시켜 안전하게 킵을 제거해야한다. 밀도가 낮은 가스킵과 이수가 섞이면 정수압이 손실된다. 또한 시추공 상부로 이동하면서 낮아지는 압력에 의해 가스킵이 팽창하여 정수압 손실이 커진다. 따라서 지표에서의 초크밸브를 조절하여 백압력을 가해 이를 보상해주어야 추가적인 킵의 유입을 막을 수 있다.

유정제어를 위해서는 시추공내의 킵의 위치와 시간에 따른 킵의 압력을 아는 것이 중요하며 압력을 안다면 그에 따른 킵의 부피는 쉽게 구할 수 있다. 파이프의 움직임이 없다고 가정했을 때 킵 상부의 압력은 식 (2-2)와 식 (2-3)으로 구할 수 있다.

$$P_{bh} = P_{x,t} + \Delta p_{acc} + \Delta p_f + \Delta p_{hy} \quad (2-2)$$

$$P_{x,t} = P_{chk} + \Delta p_{acc} + \Delta p_f + \Delta p_{hy} \quad (2-3)$$

여기서, $P_{x,t}$ 는 시간 t , 위치 x 에서의 킥 상부압력, Δp_{acc} , Δp_f , Δp_{hy} 는 각각 x 이하의 위치에서 가속압력, 마찰압력, 정수압을 나타낸다. 구체적으로 각각의 압력은 식 (2-4), (2-5), (2-6)으로 계산한다.

$$\Delta p_{acc} = \sum_i^N \left(0.016 \rho \frac{\Delta v}{\Delta t} \right)_i \Delta x_i \quad (2-4)$$

$$\Delta p_f = \sum_i^N \left(\frac{\Delta p_f}{\Delta x} \right)_i \Delta x_i \quad (2-5)$$

$$\Delta p_{hy} = \sum_i^N 0.052 \rho_i \Delta x_i \quad (2-6)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, v 는 유속, 첨자 i 는 유동방향으로의 격자수를 나타낸다.

2.2 PVT 모델

유성이수는 기저유와 각종 첨가물들로 구성되어 있으며 이 중 가장 많은 비율을 차지하는 것이 기저유이다. 기저유는 다양한 탄화수소들의 혼합물로써 압력, 온도, 조성에 따라 물성이 변화한다. 특히 기저유에 가스킵이 녹아 있는 경우 그 양에 따라 기저유의 부피 및 밀도의 변화가 크다. 따라서 가스킵과 이수 혼합물의 부피 및 밀도를 정확히 예측하기 위해 Peng-Robinson 상태방정식을 사용하였다. Peng-Robinson 상태방정식의 일반식은 식 (2-7)과 같다(Peng and Robinson, 1976).

$$p = [RT/(V_M - b)] - a(T)/(V_M(V_M + b) + b(V_M - b)) \quad (2-7)$$

여기서, $a(T)$ 는 molecular attraction parameter, b 는 molecular repulsion parameter, p 는 압력, T 는 온도, R 은 일반기체상수, V_M 은 몰부피를 의미한다.

Peng-Robinson 상태방정식의 일반식을 압축인자에 관한 3차방정식으로 표현하면 식 (2-8)과 같다.

$$Z^3 - (A - C)Z^2 + (A - 3C^2 - 2C^3)Z - (AC - C^2 - C^3) = 0 \quad (2-8)$$

여기서, Z 는 압축인자, $A = ap/R^2 T^2$, $C = bp/RT$ 를 의미하며 반복법으로 방정식의 해를 구하여 부피계산에 사용한다.

가스킵이 녹아있는 유성이수는 혼합물이므로 혼합물을 대표할 수 있는 상수 a 와 b 를 계산하여야 한다. 이는 다음과 같은 mixing rule을 사용하여 계산할 수 있다.

$$a = \sum_i \sum_j f_i f_j a_{ij}, \quad a_{ij} = (1.0 - C_{ij}) a_i^{0.5} a_j^{0.5} \quad (2-9)$$

$$b = \sum_i f_i b_i \quad (2-10)$$

주어진 온도에서 상수 a 와 b 는 다음과 같이 계산된다.

$$a(T) = a(T_c) \times \alpha(T_r, w), \quad \alpha = [1 + (0.37464 + 1.54226w - 0.26992w^2)(1.0 - T_r^{0.5})]^2 \quad (2-11)$$

$$b(T) = b(T_c) \quad (2-12)$$

임계온도에서 상수 a 와 b 는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$a(T_c) = 0.45724 R^2 T_c^2 / p_c \quad (2-13)$$

$$b(T_c) = 0.0778 R T_c / p_c \quad (2-14)$$

여기서, p_c 는 임계압력, T_c 는 임계온도, T_r 은 현재온도와 임계온도의 비, w 는 분자의 acentric factor, f_i 는 분자의 mole %, a_{ij} 는 i 분자와 j 분자간 molecular attraction parameter, C_{ij} 는 binary interaction coefficient, b_i 는 i 분자의 molecular repulsion parameter를 나타낸다. 이 때 사용된 기저유의 조성, acentric factor, binary interaction coefficient는 Table 2.1과 같다.

Table 2.1 Base oil compositions and critical properties
(O'Bryan and Bourgoyne, 1988)

Carbon Number	No.2 Diesel (mol %)	Mentor 28 (mol %)	Conoco LVT (mol %)	$T_c(^{\circ}R)$	$P_c(psia)$	Accentric factor(w)	Binary interaction coefficient (C_{ij})
9	1.3997	–	1.1736	1049.9	350.4	0.373	0.0407
10	2.5340	–	11.2037	1090.8	326.4	0.411	0.0427
11	4.0720	–	24.1092	1125.4	304.7	0.448	0.0442
12	6.5313	–	16.5396	1156.7	285.4	0.484	0.0458
13	11.6477	1.4187	11.8951	1185.7	268.1	0.518	0.0473
14	12.2027	2.2240	17.6742	1212.4	253.4	0.551	0.0488
15	16.0007	6.0817	15.2455	1237.7	244.4	0.582	0.0502
16	14.3790	11.6920	1.4253	1261.1	227.1	0.612	0.0512
17	11.8823	9.4953	+0.7333	1283.2	216.4	0.641	0.0523
18	8.9947	30.8370	–	1303.9	207.1	0.668	0.05
19	4.2977	28.1870	–	1323.5	197.7	0.694	0.0537
20	1.7457	+10.0710	–	1342.2	190.7	0.719	0.0544
21	2.5613	–	–	1360.7	182.4	0.744	0.0551
22	1.1000	–	–	1378.7	175.4	0.767	0.0558
23	0.4487	–	–	1395.3	169	0.789	0.0565
24	+0.2013	–	–	1410.6	163	0.811	0.0571

2.3 용해도 모델

가스킵이 유성이수에 용해되는 현상을 모사하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다(O'Bryan and Bourgoyne, 1988; Silva et al., 2004; Monteiro et al., 2008). 하지만 이러한 연구는 기저유의 조성과 유입되는 가스의 종류를 미리 결정하고 제한된 압력범위에서 실험을 한 뒤 그 결과를 경험식으로 제시하고 있으므로 일반적인 경우에 통용되기 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 석유공학분야에서 혼합물의 포화물성 계산에 주로 이용되는 프로그램인 Schlumberger(社)의 PVTi를 이용하여 가스의 용해도를 계산하였다. 사용자가 기저유의 조성과 가스의 종류를 입력하면 Fig. 2.1과 같이 온도, 압력에 따른 용해도곡선을 얻을 수 있으며 이 곡선을 유정제어 모델링의 입력자료로 사용하였다.

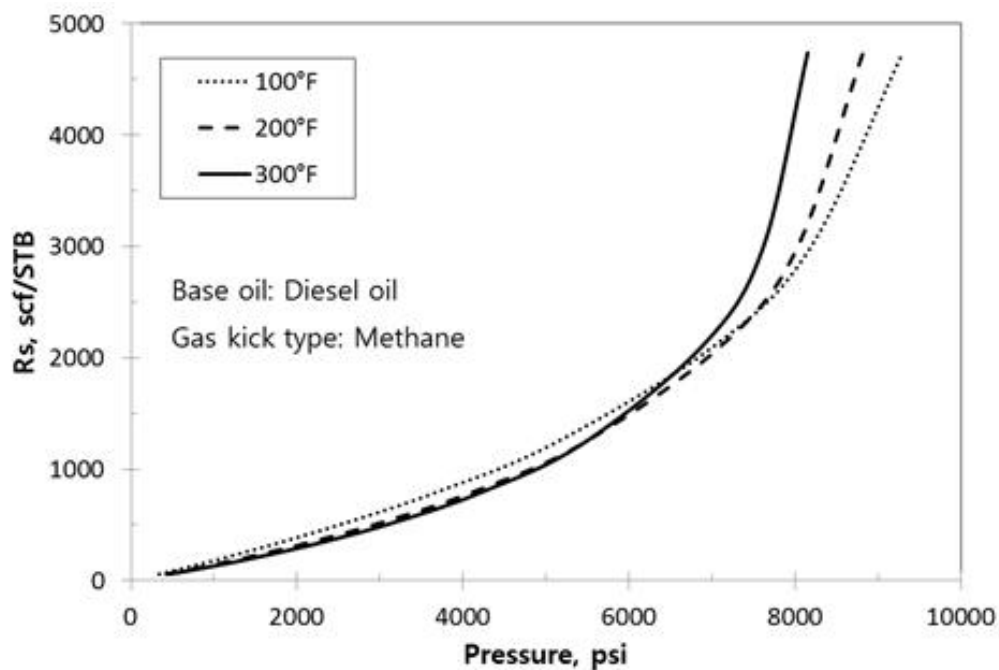


Fig. 2.1 Gas solubility curve used in this study

2.4 킥유입 모델

무한 균질 저류층에서 일정유량으로 가스가 생산되면 압력감소가 발생한다. 지층으로부터의 가스유입을 모식적으로 나타내면 Fig. 2.2와 같으며 따라서 킥 유입 관계식은 일정유량의 가스생산에 의한 압력감소식을 변형하여 식 (2-15)와 같이 나타낼 수 있다(Lee, 1982).

$$q_g = \frac{T_{sc} h k [m(p_{fm}) - m(p_{bh})] \Delta p}{50,300 p_{sc} T \left[1.151 \log \left(\frac{kt}{1,688 \phi \mu c_t r_w^2} \right) + S \right]} \quad (2-15)$$

$$m(p) = 2 \int_{p_0}^p \frac{p}{\mu z} dp$$

여기서, $m(p)$ 는 유사압력(pseudo pressure), q_g 는 가스유입량, T 는 온도, h 는 저류층을 시추한 깊이, k 는 지층의 유체투과율, t 는 시간, μ 는 가스점성도, r 은 유정의 반지름, ϕ 는 저류층 공극률, c_t 는 총 압축률, S 는 유정손상지수(skin factor)를 나타낸다. 이 때 첨자 sc 는 표준조건의 온도와 압력이다(14.7 *psi*, 60 ° *F*).

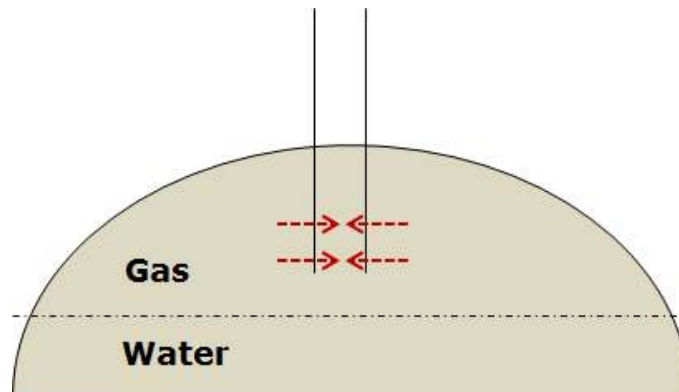


Fig. 2.2 Schematic image of gas kick inflow

2.5 시추공 온도분포 모델

애널리스로 유입된 가스키는 온도에 따라 부피가 달라지므로 시추의 전 과정에 걸쳐 깊이로 따른 유정의 온도분포를 아는 것은 중요하다. 실제로 애널리스에서 순환하는 이수의 온도는 단순히 지층의 온도구배에 따른 온도와는 차이가 있으며 유체의 대류현상, 주변 지층 및 시추파이프 내의 유체와의 열전달에 영향을 받는다 (Fig. 2.3). 따라서 순환하는 이수의 정확한 온도 모델링이 필요하다.

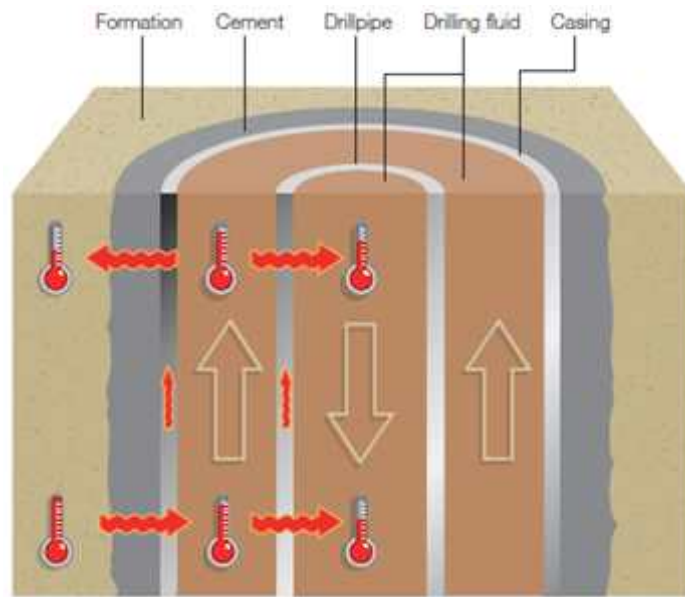


Fig. 2.3 Heat transfer in the wellbore(Adamson et al., 1998)

Holmes와 Swift(1970)는 이러한 열전달을 정상상태로 가정하고 이수순환유량, 순환 유체특성, 지층특성, 시추공의 깊이로 따른 애널리스 온도분포를 제시하였다.

$$T_a = K_1 C_3 e^{C_1 z} + K_2 C_4 e^{C_2 z} + Gz + T_s \quad (2-16)$$

$$K_1 = T_i - K_2 - T_s + GA$$

$$K_2 = \frac{GA - [T_i - T_s + GA]e^{C_3 z_t}(1 - C_3)}{e^{C_2 z_t}(1 - C_4) - e^{C_3 z_t}(1 - C_3)}$$

$$C_1 = (B/2A)[1 + (1 + 4/B)^{1/2}] K_1 = T_i - K_2 - T_s + GA$$

$$C_2 = (B/2A)[1 - (1 + 4/B)^{1/2}]$$

$$C_3 = 1 + B/2[1 + (1 + 4/B)^{1/2}]$$

$$C_4 = 1 + B/2[1 - (1 + 4/B)^{1/2}]$$

여기서, $A = mc_p/2\pi r_p h_p$ 이며 $B = rU/r_p h_p$ 이다. T_a 는 애놀러스 온도($^{\circ}F$), T_i 는 이수 주입온도($^{\circ}F$), T_s 는 지표온도($^{\circ}F$), G 는 지층온도구배($^{\circ}F/100ft$), z 는 깊이(ft), z_t 는 지층의 총 깊이(ft)이다. r 은 유정의 반지름(ft), r_p 는 시추파이프의 반지름(ft), m 은 이수의 질량유량(lb/hr), c_p 는 이수의 비열($Btu/lb/^{\circ}F$), h_p 는 시추파이프로의 전체 열전달계수($Btu/hr/ft^2/^{\circ}F$), U 는 애놀러스로의 전체 열전달계수($Btu/hr/ft^2/^{\circ}F$)이다.

2.6 시추공 궤도 모델

시추공은 심부의 목표지점에 도달하기 위하여 의도적으로 수직이 아닌 궤도로 시추할 수 있으며 이를 방향성시추라 한다. 방향성시추는 다양한 목적에 의해 이루어질 수 있으며 수직시추에 비해 개발비용을 절감할 수 있고 저류층 생산성 향상, 저류층 생산관리에 유리하다는 장점이 있다(Choe, 2011). Fig. 2.4는 방향성시추의 개념도를 나타낸 것이다. KOP(kick off point)는 수직으로 시추하다가 처음으로 방향성시추를 시작하는 지점을 말한다. 빌드구간(build section)은 시추공의 경사각을 증가하는 구간을 말하며 빌드가 끝나는 지점을 EOB(end of build)라 한다. 이때 경사각을 증가시키는 정도를 BUR(build up rate)로 표시할 수 있으며 단위는 $\text{deg}/100\text{ft}$ 이다. 홀드구간(hold section)은 경사각을 유지하는 구간이며 드랍구간(drop section)은 경사각을 감소시키는 구간이다. 이렇게 시추공 경사의 조절을 통해 다양한 이차원 시추궤도 타입이 결정된다.

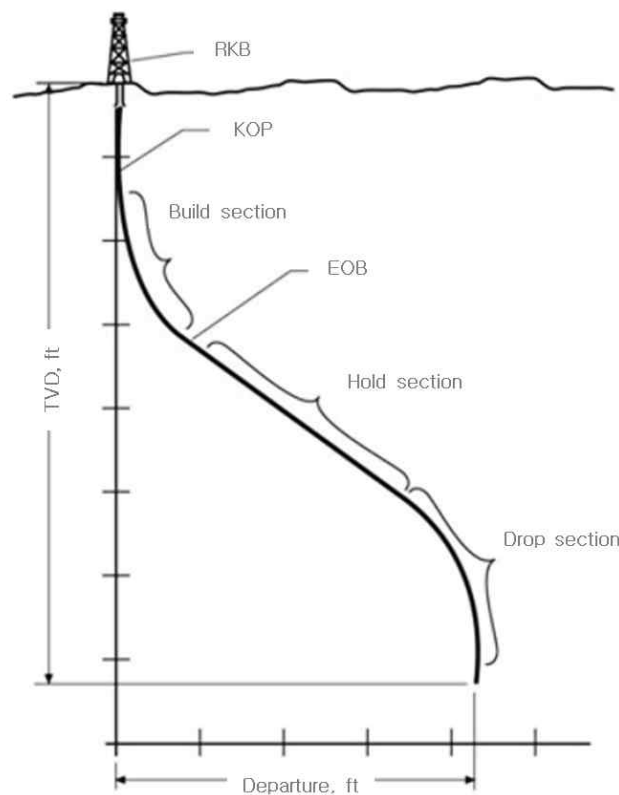


Fig. 2.4 Wellbore trajectory example

2.7 가스상승속도 모델

유정 내에서 가스화 이수가 혼합되어 있는 경우 밀도차에 의해서 상대속도 차이가 발생한다. 이를 가스상승속도(gas slip velocity)라 하며 유정제어시 킥의 거동을 정확하게 모사하는데 필요한 요소 중 하나이다. 이러한 가스상승속도는 유량과 유동패턴, 유동경로의 기하에 영향을 받으므로 이에 대한 고려가 필요하다. Harmathy(1960)에 따르면 가스상승속도는 다음과 같이 정의된다.

$$v_g = Cv_n + v_s \quad (2-17)$$

여기서, v_g 는 실제 가스 상승속도이고 v_n 은 미끄러짐현상을 고려하지 않은 혼합물의 상승속도이다. C 는 유동패턴에 따라 달라지는 상수이며, v_s 는 혼합물의 이동에 대한 상대 가스상승속도이다. Harmathy는 무한 매질에서의 단일기포 상승속도를 다음과 같이 제시하였다.

$$v_{s0} = 0.477 \left(\frac{\sigma(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right)^{0.25} \quad (2-18)$$

여기서 v_{s0} 는 단일기포의 상승속도, σ 는 표면장력, ρ_g 와 ρ_l 은 각각 가스와 이수의 밀도, A 는 유동단면적이다. 위의 식은 원칙적으로 원기둥형태의 수직파이프에서 이상유체의 유동을 표현하는 식이지만 애널리시스에서도 적용이 가능하며 가스부피비(gas holdup)가 0.25보다 작은 경우에 한해서 경사파이프에서도 사용가능하다.

Hasan과 Kabir(1988)는 유동경로(수직정, 경사정), 유동위치(파이프, 애널리시스), 유동패턴(bubble flow, slug flow, churn flow, annular flow) 등에 따라 달라지는 가스상승속도를 계산하기 위해 다음과 같은 변수들을 정의하였다. 이러한 변수들의 값에 따라 C 와 v_s 값이 달라지며 이로 인해 실제 가스상승속도, v_g 가 계산된다.

$$X_{bubble} = 0.429v_{ls} + 0.357v_s \quad (2-19)$$

$$X_{slug} = 17.1 \log(\rho_l v_l^2) - 23.2, \text{ if } \rho_l v_l^2 > 50 \\ 0.00673(\rho_l v_l^2)^{1.7}, \text{ if } \rho_l v_l^2 < 50 \quad (2-20)$$

$$X_{ann} = 0.967 \left(\frac{\sigma(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2} \right)^{0.25} \quad (2-21)$$

$$X_{gas} = \rho_g v_{gs}^2 \quad (2-22)$$

$$v_{ls} = \frac{q_l}{3.117A}, \quad v_{gs} = \frac{q_g}{3.117A} \quad (2-23)$$

2.7.1 수직정

① Bubble Flow ($v_{gs} < X_{bubble}$)

v_s 는 Harmathy가 제안한 v_{s0} 와 같고 유동이 애눌러스에서 일어나는 경우

$C = 1.2 + 0.371 \frac{d_i}{d_o}$ 로 표현된다. 이 때는 d_o, d_i 는 각각 애눌러스의 외경과 내경을 의미한다.

② Slug Flow ($v_{gs} > X_{bubble}$, $X_{gas} < X_{slug}$)

유동위치에 따라 파이프에서는 $v_s = 0.565 \left(\frac{d(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right)^{0.5}$,

애눌러스에서는 $v_s = (0.491 + 0.36 \frac{d_i}{d_o}) \left(\frac{(d_o - d_i)(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right)^{0.5}$ 이고 $C = 1.2 + 0.9 \frac{d_i}{d_o}$ 로 나타낼 수 있다.

③ Churn Flow ($v_{gs} < X_{ann}$, $X_{gas} > X_{slug}$)

v_s 는 slug flow와 같으며 애눌러스 유동 시 $C = 1.15 + 0.9 \frac{d_i}{d_o}$ 로 표현된다.

④ Annular Flow ($v_{gs} > X_{ann}$)

가스의 높은 집적도로 인하여 v_s 는 0이 되고 C 는 1의 값을 갖는다.

2.7.2 경사정

기본적으로 경사정에서도 수직정과 비슷한 유동패턴을 가지며 θ 를 수직으로부터의 경사각으로 정의한다.

① Bubble Flow ($v_{gs} < X_{bubble} \cos \theta$)

v_s 와 C 는 수직정에서의 bubble flow와 동일하다.

② Slug Flow ($v_{gs} > X_{bubble}$, $X_{gas} < X_{slug}$)

이 경우 $v_s = \left(0.565 + 0.164 \frac{d_i}{d_o}\right) \left(\frac{d_o(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l}\right)^{0.5} \sqrt{\cos \theta} (1 + \sin \theta)^{1.2}$, $C = 1.2 + 0.7 \left(\frac{d_i}{d_o}\right)$ 가 된다.

③ Churn Flow ($v_{gs} < X_{ann}$, $X_{gas} > X_{slug}$)

v_s 는 수직정에서의 slug flow와 같으며 $C = 1.15 + 0.7 \frac{d_i}{d_o}$ 로 표현된다.

④ Annular Flow ($v_{gs} > X_{ann}$)

수직정의 경우와 마찬가지로 가스의 높은 집적도로 인하여 v_s 는 0이 되고 C 는 1이 된다.

2.8 이상 마찰손실 모델

시추공 내에서 유체가 유동함에 따라 유동방향과 반대방향으로 마찰손실이 발생하게 되며 이는 시추공저압력을 구성하는 요소 중 하나이다. 특히 이상거동 시에는 단상거동과는 다른 마찰손실값을 가지는데 이를 정확히 계산하여야 다상극의 거동양상을 모사할 수 있다. 이상 마찰손실을 계산하기 위한 기본 식은 단상일 때의 마찰손실 계산식과 동일하다(식 2-24). f_{tp} 는 이상 거동 시 필요한 마찰계수로 Beggs and Brill 상관식(1973)을 통해 계산된다.

$$\frac{\Delta p_f}{\Delta L} = f_{tp} \frac{\rho v^2}{25.8d} \quad (2-24)$$

$$\rho_n = \rho_l \lambda_l + \mu_g \lambda_g$$

$$\mu_n = \mu_l \lambda_l + \mu_g \lambda_g$$

$$v_n = \frac{q_l + q_g}{3.117A}$$

여기서, ρ 는 밀도, μ 는 점성도, q 는 유량, v_n 은 미끄러짐 현상을 고려하지 않은 혼합물의 상승속도, A 는 유동단면적, λ 는 미끄러짐 현상을 고려하지 않은 액체부피비이고 첨자 l, g 는 각각 이수와 가스극을 의미한다.

2.8.1 Beggs and Brill 상관식

이상 마찰계수는 가스 미끄러짐 현상을 고려한 실제 액체부피비 $H_l(\theta)$ 와 유동경로의 경사도 θ 를 이용하여 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$f_{tp} = f e^s \quad (2-25)$$

$$f = \left[2 \log \left(\frac{N_{Ren}}{4.5223 \log(N_{Ren}) - 3.8215} \right) \right]^{-2}$$

$$S=\frac{\ln (y)}{-0.0523+3.182 \ln (y)-0.8725[\ln (y)]^2+0.01853[\ln (y)]^4}$$

$$N_{Ren}=\frac{928\rho_nv_nd}{\mu_n}$$

$$y=\frac{\lambda}{\left[H_l(\theta)\right]^2}$$

$$H_l(\theta)=H_l(0)\Big\{1+C\Big[\sin(1.8\theta)-\frac{1}{3}sin^3(1.8\theta)\Big]\Big\}\,\,\,(H_l(0)\geq\,\lambda,\,0\leq\,H_l(\theta)\leq 1)$$

제 3장 유성이수 유정제어 모델링

3.1 유정제어모델

본 연구에서는 유정제어 모델링을 위해 수치해석적 안정성이 있는 대체이상모델을 사용하였다. 이 모델은 킥과 이수가 섞여있는 구간은 이상구간으로 보고 나머지 구간은 이수만 존재하는 단상(1-phase)구간으로 간주하여 각각의 물성 및 압력들을 계산한다. 이 모델은 유정전체를 격자단위로 나누고 질량 및 운동량 보존방정식을 풀어 계산을 수행하는 완전이상모델(full 2-phase model)에 비해 수치적으로 안정성이 높으며 비슷한 정확도를 보인다.

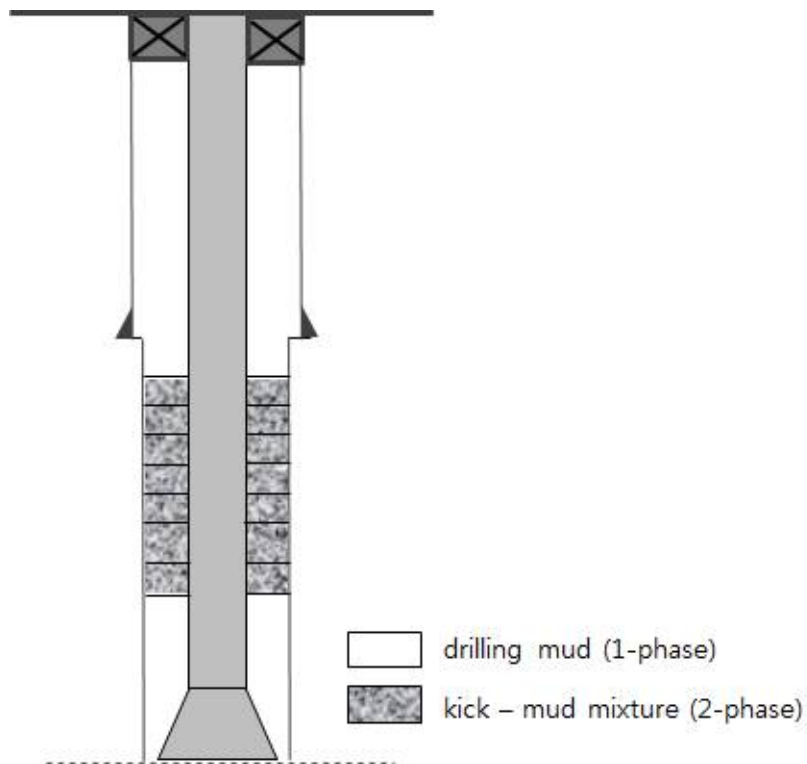


Fig. 3.1 Well control model(Choe and Juvkam-Wold, 1997)

3.2 모델링 알고리즘

유성이수의 유정제어상황을 모델링하기위한 구체적인 과정은 Fig. 3.2와 같다. 유정제어는 크게 지층에서부터 킁이 유입되는 과정과 초크압력을 조절하여 킁을 제거하는 과정으로 나눌 수 있다.

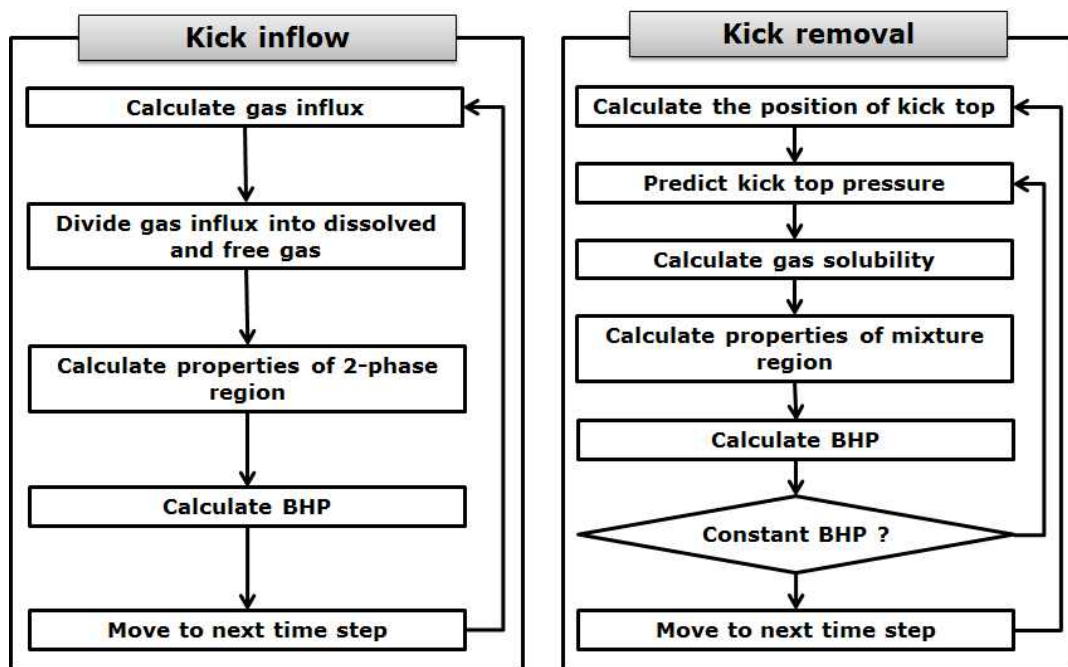


Fig. 3.2 Modeling algorithm of kick inflow and kick removal

시추과정 중 고압지층을 만나 시추공저압력이 지층압력보다 낮아지면 킁이 유입된다. 유입된 킁은 용해도에 따라 용해가스와 자유가스로 존재한다. 가스가 용해된 유성이수와 자유가스의 물성은 상태방정식을 통해 계산한다. 이렇게 계산된 각 구간의 압력을 통해 새로운 시추공저압력이 계산되고 지층압력과의 차이에 따라 다음 킁이 유입된다.

킁을 제거하는 과정에서는 추가적인 킁을 방지하기 위해 시추공저압력을 지층의 압력과 동일하게 유지하는 일정공저압력법(constant BHP method)을 사용하였다. 순환유량과 시추공의 기하를 통해 주어진 시간동안 이동한 가스킁의 새로운 위치를 결정한다. 킁이 포함된 구간의 상부압력을 예측하고 이 압력에 기반하여 용해도를

계산한다. 킥유입상황과 마찬가지로 가스가 용해된 유성이수와 자유가스의 물성을 상태방정식을 통해 계산한다. 가스킥이 존재하는 구간과 상부, 하부구간의 압력을 더하여 시추공저압력을 얻을 수 있고 이 압력이 지층압력과 같아질 때까지 킥 상부의 압력을 반복하여 계산한다. 킥 상부의 압력은 이수에 의한 정수압과 마찰손실, 가속손실, 초크에 의한 백압력을 모두 포함하고 있으며 나머지 압력은 알고 있는 정보이므로 지표에서 가해주어야 할 초크압력을 얻을 수 있다.

3.3 유정제어모델 검증

개발된 유정제어모델을 완전이상모델을 이용한 상용프로그램의 결과와 비교하여 검증하였다. Table 3.1과 같은 조건에서 수성이수와 유성이수에 대해 각각 비교를 수행하였다.

Table 3.1 Input data for verification of developed model

Variable	Value
Well location	Onshore
Well trajectory type	Vertical
True vertical depth, <i>ft</i>	10,000
Mud density, <i>ppg</i>	14
Base oil type	No. 2 diesel
Well control method	Driller's method
Gas influx rate, <i>bbl/min</i>	1
Shut in time, <i>min</i>	10

Fig. 3.3과 Fig. 3.4는 수성이수에 대해 Fig. 3.5과 Fig. 3.6은 유성이수에 대해 개발된 모델과 상용프로그램의 시간에 따른 이수부피증가와 초크압력을 비교한 것이다. 두 결과에서 이수부피증가와 초크압력의 최대치에 도달하는 시점 및 그 때의 값이 비슷하게 나타난다는 것을 알 수 있다. 또한 유성이수의 결과에서는 초기에 유입된 kick 이수에 용해되어 있어 이수부피가 거의 증가하지 않는 현상을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. 하지만 개발된 모델과 상용프로그램에서 사용한 가스상승 모델과 상태방정식, 용해도모델이 상이함으로 인해 그 시점과 값에 약간의 차이가 발생한다. 하지만 이 차이는 일정한 경향을 보이고 있다.

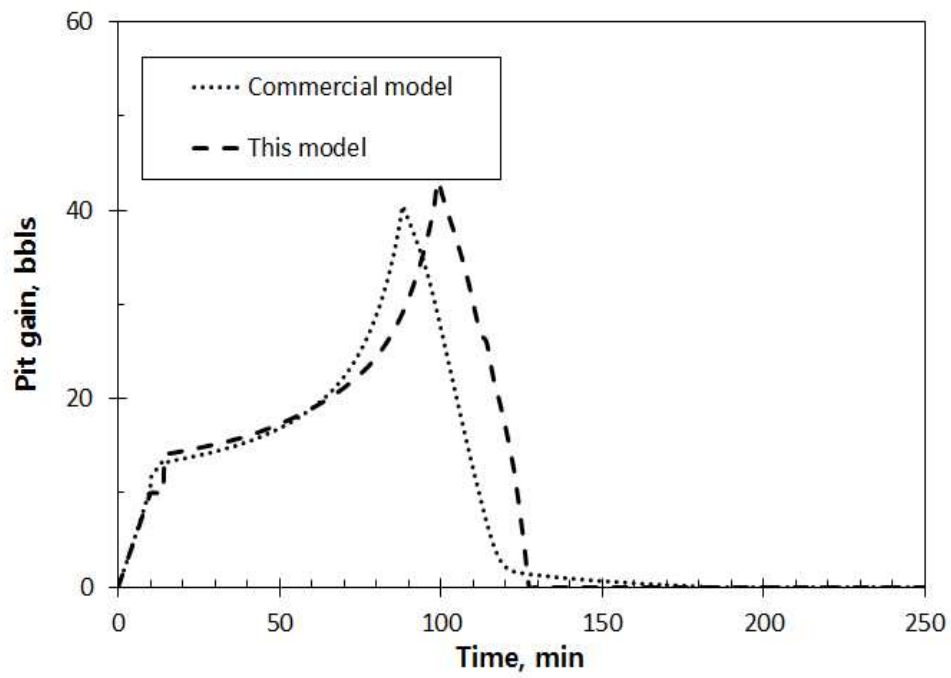


Fig. 3.3 Pit gain comparison with a commercial model: WBM

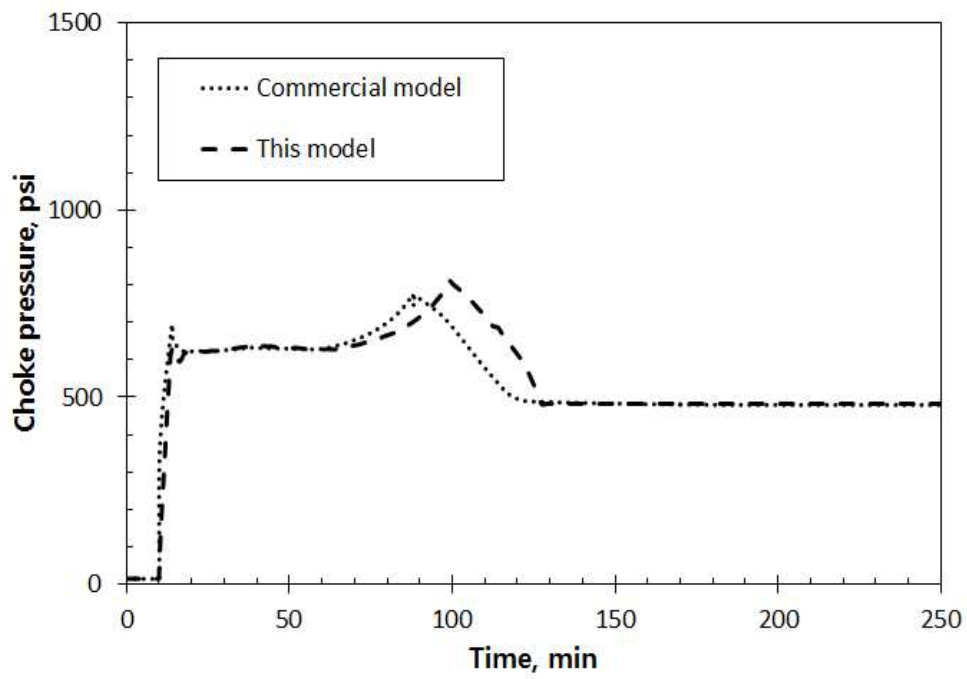


Fig. 3.4 Choke pressure comparison with a commercial model: WBM

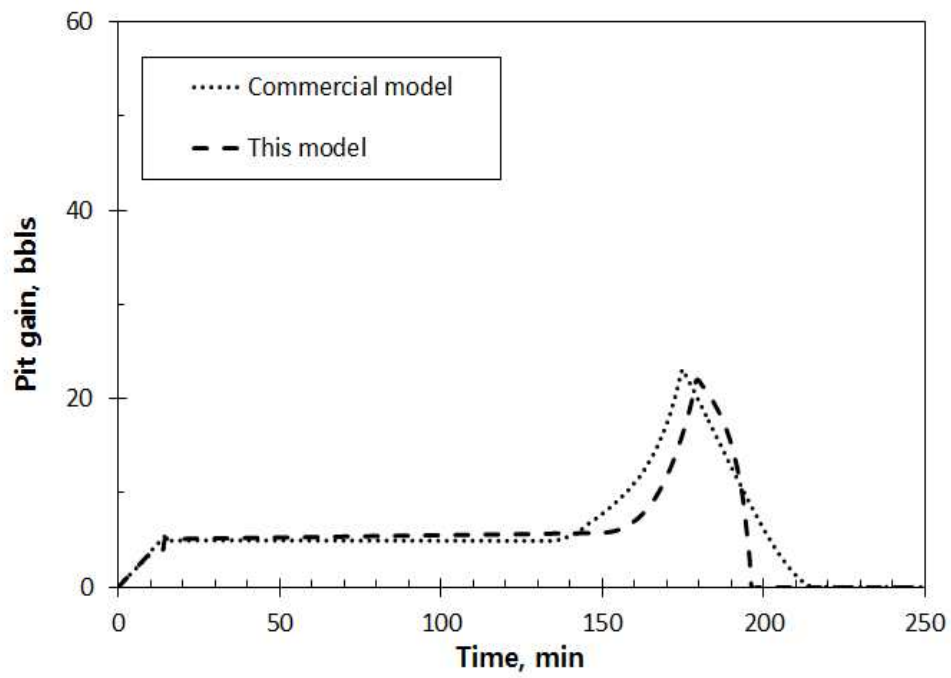


Fig. 3.5 Pit gain comparison with a commercial model: OBM

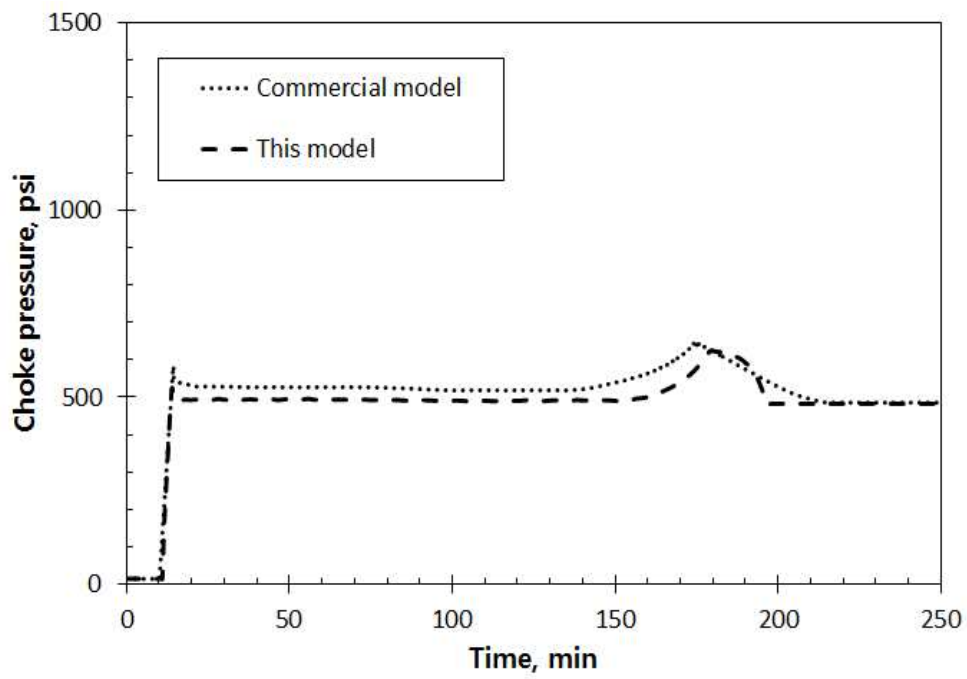


Fig. 3.6 Choke pressure comparison with a commercial model: OBM

제 4장 결과

4.1 입력자료

개발된 유성이수 유정제어모델을 다양한 상황에 적용하여 각 상황별 유정제어특징을 분석하기 위해 다음과 같은 기본입력자료를 구성하였다(Table 4.1). 시추궤도는 동일한 목표지점에 대해 Fig. 4.1과 같이 세가지(수직정, 방향정, 수평정)궤도를 사용하였다.

Table 4.1 Default input data

Variable	Value	Variable	Value
Well Location	Offshore	Pump rate while drilling, <i>gpm</i>	337.1
Well vertical depth, <i>ft</i>	10,000	Pump rate while kill operation, <i>gpm</i>	168.5
Water depth, <i>ft</i>	1,000	Formation over pressure, <i>psi</i>	520
Mud density, <i>ppg</i>	14	Gas kick type	Methane
Base oil type	No. 2 Diesel	Shut in time, <i>min</i>	2.5
Length of HWDP, <i>ft</i>	1,000	Formation skin factor	2
Length of drill collars, <i>ft</i>	600	Formation porosity, <i>fraction</i>	0.25
ID of the last casing, <i>in</i>	11	Rate of penetration, <i>ft/hr</i>	60
Open hole diameter, <i>in</i>	9.875	Surface temperature, $^{\circ}F$	59.5
OD and ID of drill pipe, <i>in</i>	5×4.214	Mud injection temperature, $^{\circ}F$	75
OD and ID of HWDP, <i>in</i>	5.5×3	Formation temperature grad., $^{\circ}F/100ft$	1.127
OD and ID of drill collar, <i>in</i>	7.5×2	Mud specific heat, <i>Btu/lb/°F</i>	0.4
ID of choke line, <i>in</i>	4	Overall heat transfer coeff. across drill pipe, <i>Btu/hr/ft²/°F</i>	30
ID of marine riser, <i>in</i>	19	Overall heat transfer coeff. across wellbore, <i>Btu/hr/ft²/°F</i>	1.0

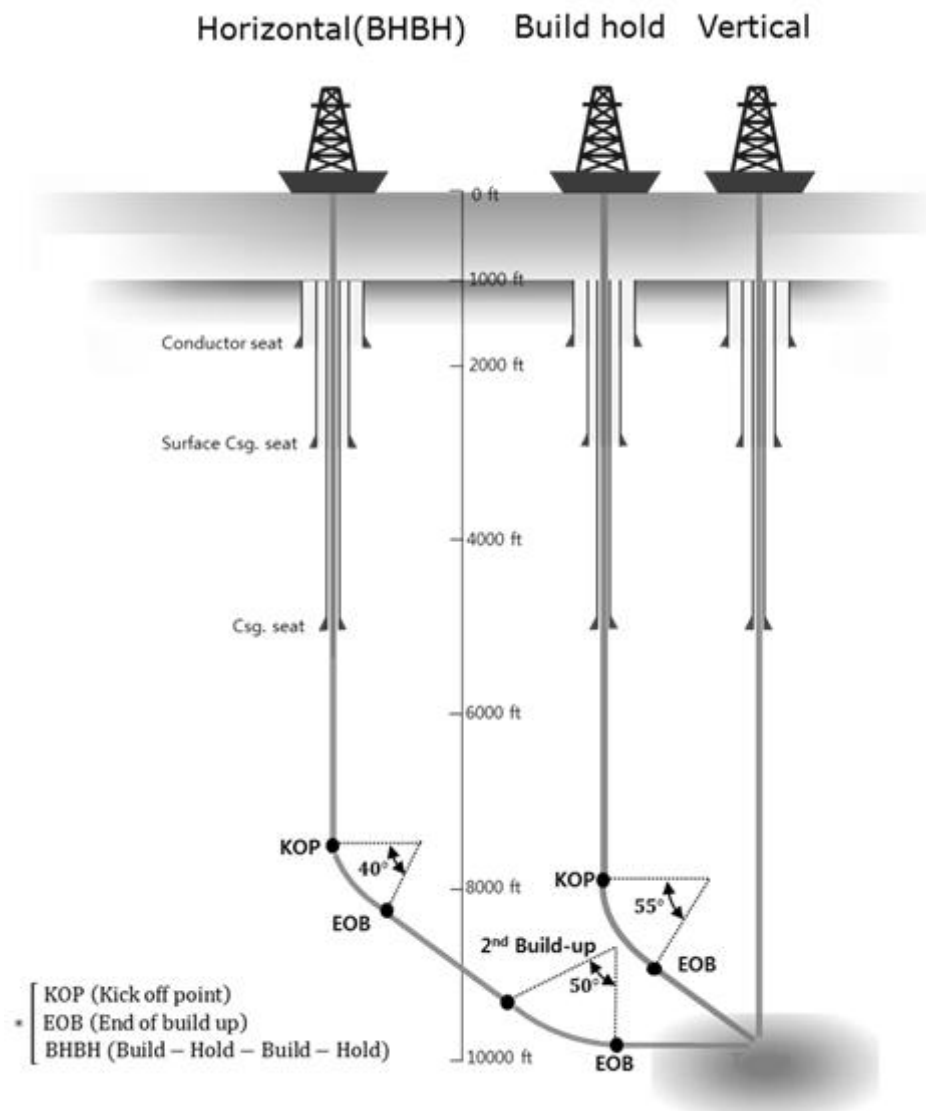


Fig. 4.1 Three well trajectories used in this study

4.2 이수종류에 따른 유정제어분석

수성이수와 유성이수를 사용하여 동일한 지층을 시추하였을 때 유입되는 킁을 감지하고 제거하는 과정을 비교하였다. 기본적으로 설정한 지층의 유체투과율은 250 md이며 킁 유입후 2.5분 후에 킁을 감지하고 유정을 폐쇄하였다. 유정제어방법은 2회의 이수순환을 통해 가스킁을 제거하는 시추자방법을 사용하였다.

Fig. 4.2는 시간에 따른 이수부피증가를 보여준다. 수성이수는 유입된 가스킁이 자유가스 상태로 존재하기 때문에 이수부피증가가 크다. 유성이수의 경우에는 가스킁이 이수에 용해되면서 이수의 팽창(swelling)현상으로 인해 이수부피가 약간 증가하지만 그 증가폭이 수성이수보다 작다. 가스가 용해되어 있는 유성이수가 지표로 순환하면서 상부의 압력이 감소하면 녹아있던 가스가 빠져나오면서 팽창하여 이수부피가 증가한다. 유성이수를 사용한 경우 대부분의 가스가 이수와 함께 유동하므로 가스상승의 영향이 적어 수성이수에 비해 킁이 지표에 도달하는 시간이 늦다.

Fig 4.3은 시간에 따른 초크압력변화를 보여준다. 수성이수에서는 자유가스 상승시 시추공 기하가 변하는 구간에서 수직높이가 변화하여 초크압력의 변동이 크다. 하지만 유성이수에서는 대부분의 가스가 이수에 녹아 단상으로 유동하므로 초크압력의 변동이 적다. 유성이수에서는 킁이 지표에 도달하더라도 녹아있던 가스킁이 모두 빠져나오지 못하기 때문에 수성이수보다 초크압력의 최대치가 낮다는 것을 알 수 있다.

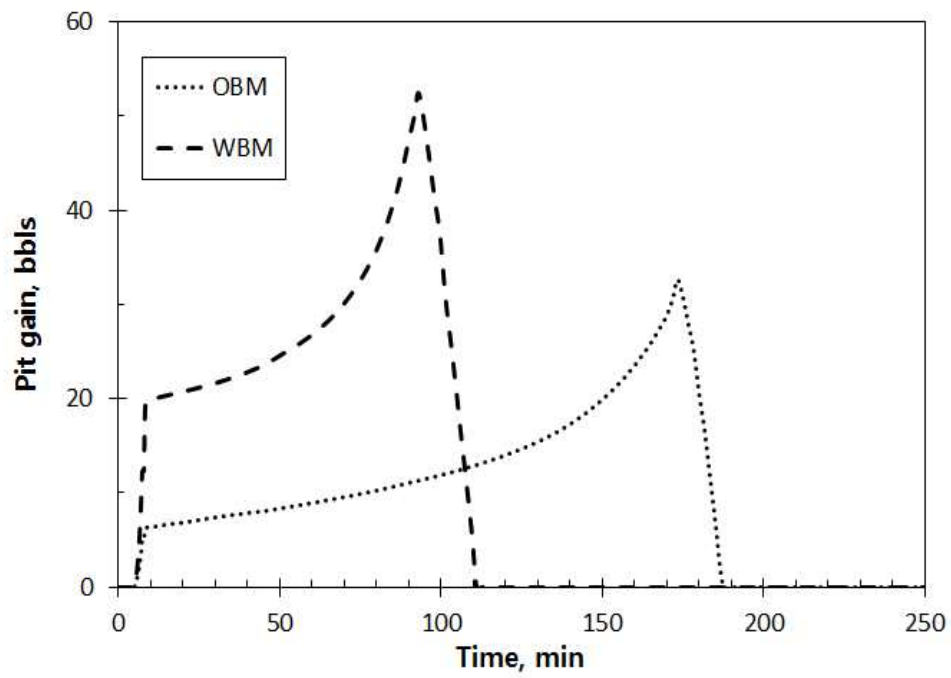


Fig. 4.2 Pit gains for OBM and WBM

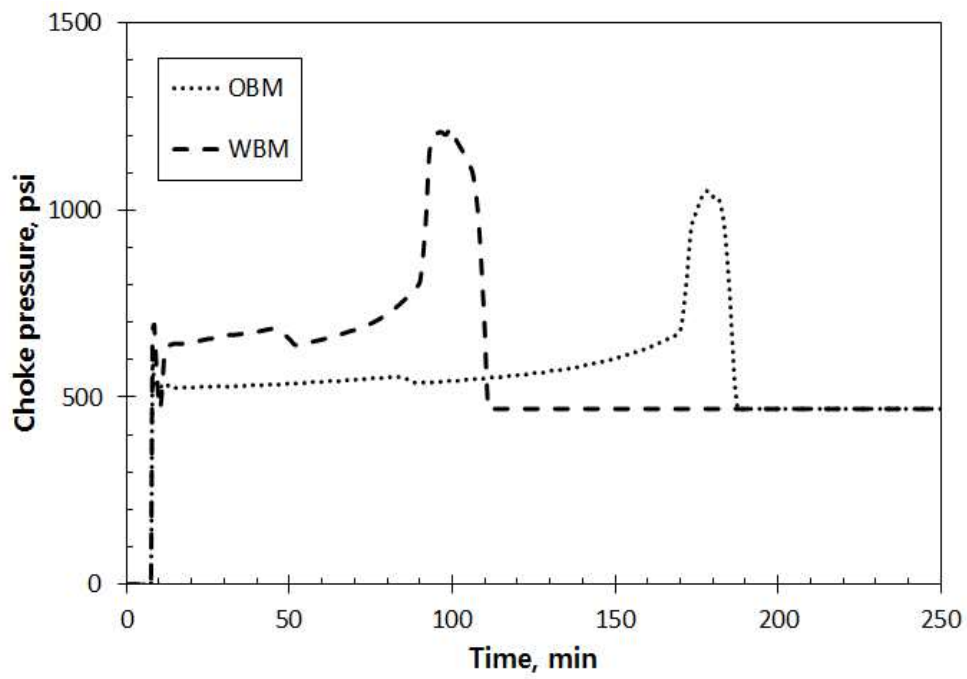


Fig. 4.3 Choke pressures for OBM and WBM

4.3 시추궤도에 따른 유정제어분석

Fig. 4.1에서 볼 수 있듯이 동일한 목표층을 시추하더라도 시추궤도는 다양하게 구성될 수 있다. 세 가지 종류의 유정궤도(수직정, 방향정, 수평정)에 대해 시추작업 중 가스킵이 발생하였을 때의 상황을 분석하였다.

Fig. 4.4와 Fig. 4.5는 수성이수의 시추궤도별 이수부피증가와 초크압력의 변화양상을 보여준다(Choe et al, 2004). 초기 이수부피증가는 수직정이 가장 높고 방향정, 수평정 순으로 나타난다. 유입된 가스킵은 수성이수에 용해되지 않으므로 이수부피증가는 유입된 가스량으로 볼 수 있다. 이수에 비해 낮은 밀도를 가지는 가스킵은 유정에서 정수압을 감소시키며 그 크기는 가스킵이 차지하는 수직높이에 비례한다. 그러므로 지층과 유정의 압력차 Δp 가 큰 수직정, 방향정, 수평정 순으로 더 많은 가스가 유입된다. 따라서 킵이 지표에 도달하였을 때 궤도별 이수부피증가 최대치가 다르다.

지표에서 가해주어야 할 초크압력은 가스킵이 위치한 유정 내 기하에 의해 증감을 보이며 가스킵이 팽창함에 따라 그 값이 커진다. 세 가지 궤도는 동일한 수직깊이를 가지지만 측정깊이는 다르다. 측정깊이가 깊수록 가스킵이 지표로 이동하는데 걸리는 시간이 길기 때문에 초크압력의 최대시점은 수평정에서 가장 늦게 나타난다.

Fig. 4.6과 4.7은 유성이수를 사용한 경우 시추궤도에 따른 이수부피증가와 초크압력의 변화양상을 보여준다. 유성이수의 경우 유입된 가스킵이 용해되므로 궤도에 따른 정수압감소의 차이가 크지 않다. 따라서 초기 이수부피증가가 시추궤도에 민감하지 않다. 킵이 시추궤도 내의 수평구간을 지날때는 킵 상부에 가해지는 압력이 동일하므로 용해가스의 방출 및 자유가스의 팽창이 제한되어 수평구간을 지나는 동안 이수부피증가가 일정하게 나타난다. 이러한 현상은 킵감지를 더욱 어렵게 만든다. 초크압력은 수성이수와 마찬가지로 측정깊이의 차이에 따라 최대시점이 달라지며 초기 유입량이 비슷하기 때문에 최대값 또한 비슷함을 알 수 있다.

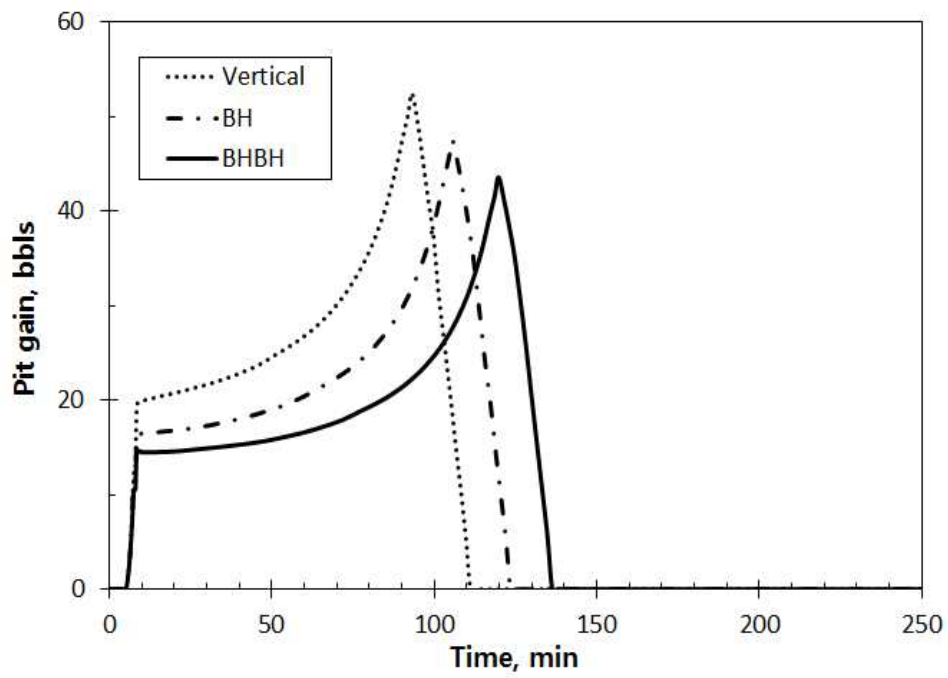


Fig. 4.4 Pit gains for the three trajectory types: WBM

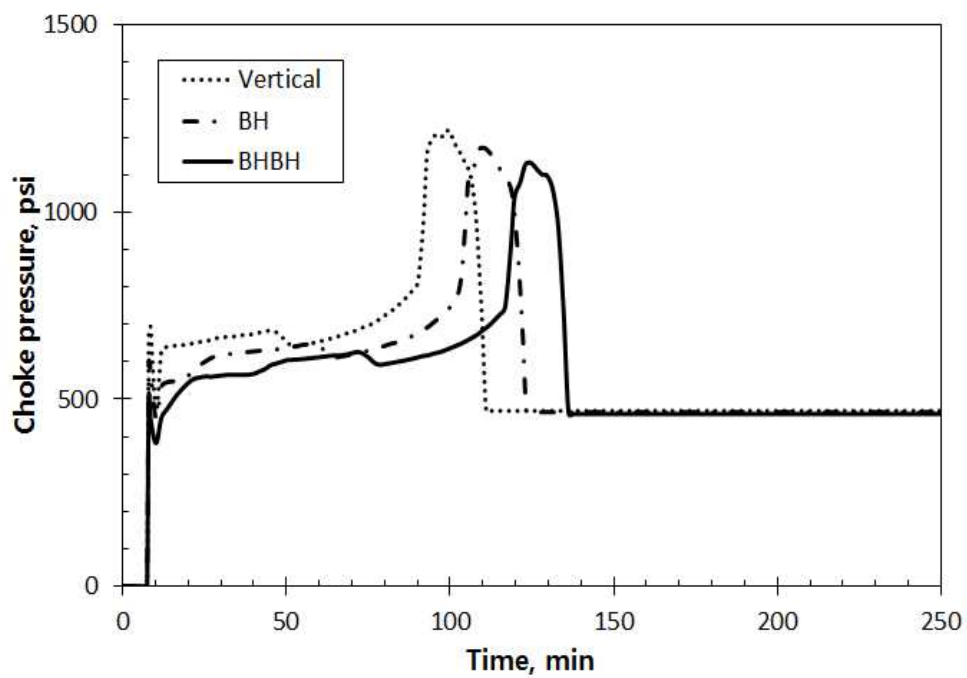


Fig. 4.5 Choke pressures for the three trajectory types: WBM

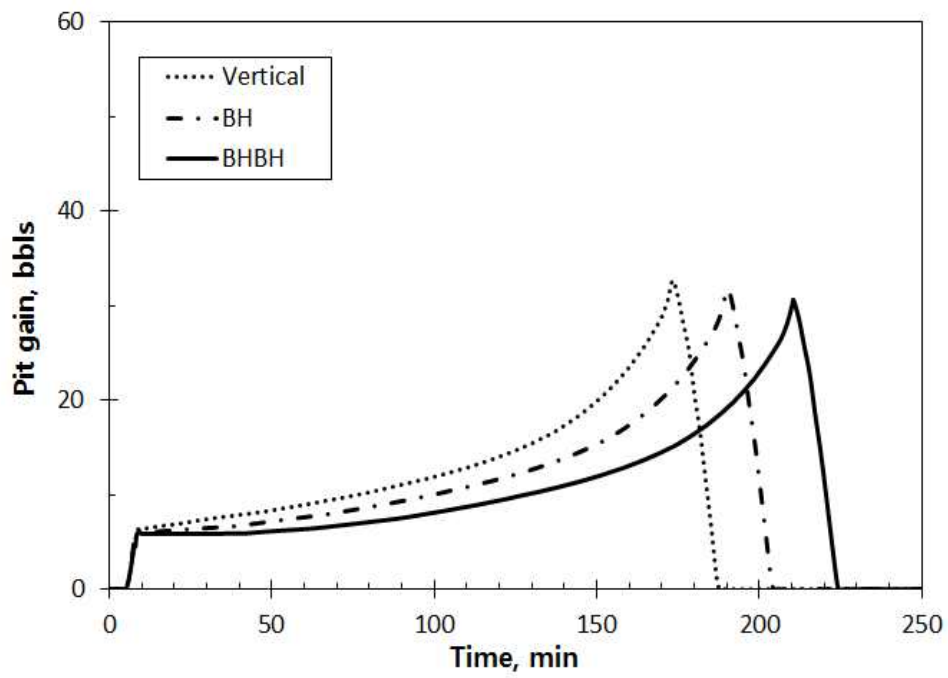


Fig. 4.6 Pit gains for the three trajectory types: OBM

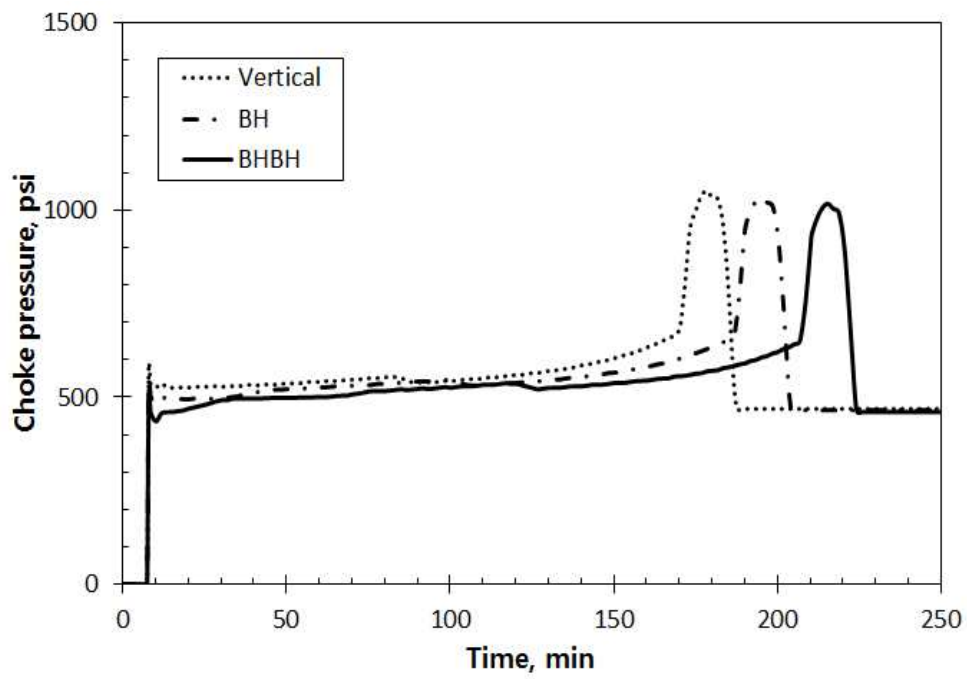


Fig. 4.7 Choke pressures for the three trajectory types: OBM

4.4 지층조건에 따른 유정제어분석

킱이 유입되는 지층의 조건은 유입되는 가스의 초기 유입량과 시추공내의 가스킱 분포에 영향을 미친다. 유체투과율이 각각 250md, 150md, 50md인 지층을 시추하였을 때 유정제어 상황을 분석하였다.

Fig. 4.8은 지층의 유체투과율에 따른 이수부피증가를 보여준다. 지층의 유체투과율이 높을수록 단위시간당 더 많은 가스가 유입된다. 세가지 지층에서 모두 동일한 이수의 순환유량을 가정하였으므로 유체투과율이 높을수록 초기 가스오일비 (gas-oil-ratio)가 높아진다. 단위 부피당 섞여있는 가스양이 많을수록 더 높은 압력에서 가스가 빠져나와 이수부피의 증가시점이 빨라진다.

Fig. 4.9는 지층의 유체투과율에 따른 초크압력의 변화를 보여준다. 지층의 유체투과율이 50md로 낮은 경우 가스킱이 녹아있는 이수가 지표에 도달할때까지 초크압력이 변하지 않는 것을 알 수 있다. 가스오일비가 높을수록 많은 양의 자유가스가 빠져나오기 때문에 더 빠른 시간에 초크압력이 최대치에 도달한다는 것을 알 수 있다. 낮은 유체투과율을 갖는 지층에서는 단위시간당 적은양의 가스가 유입되어 모두 이수에 녹는다. 따라서 초기 이수부피증가가 적어 킱이 유입되었는지 모르고 계속 시추를 진행할 수 있으므로 킱감지에 주의해야 한다.

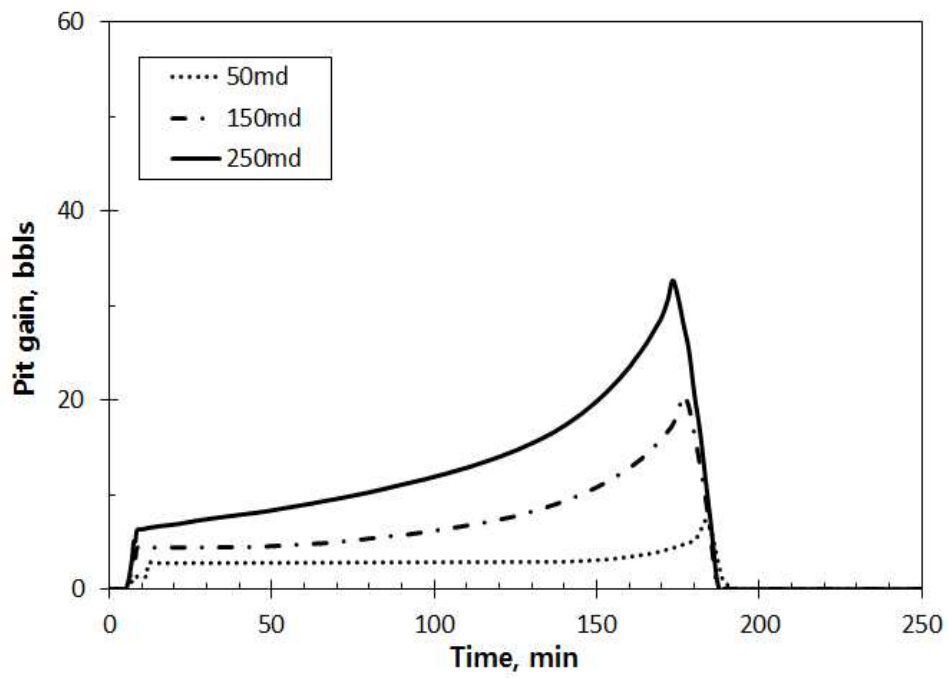


Fig. 4.8 Pit gains for different formation permeabilities: OBM

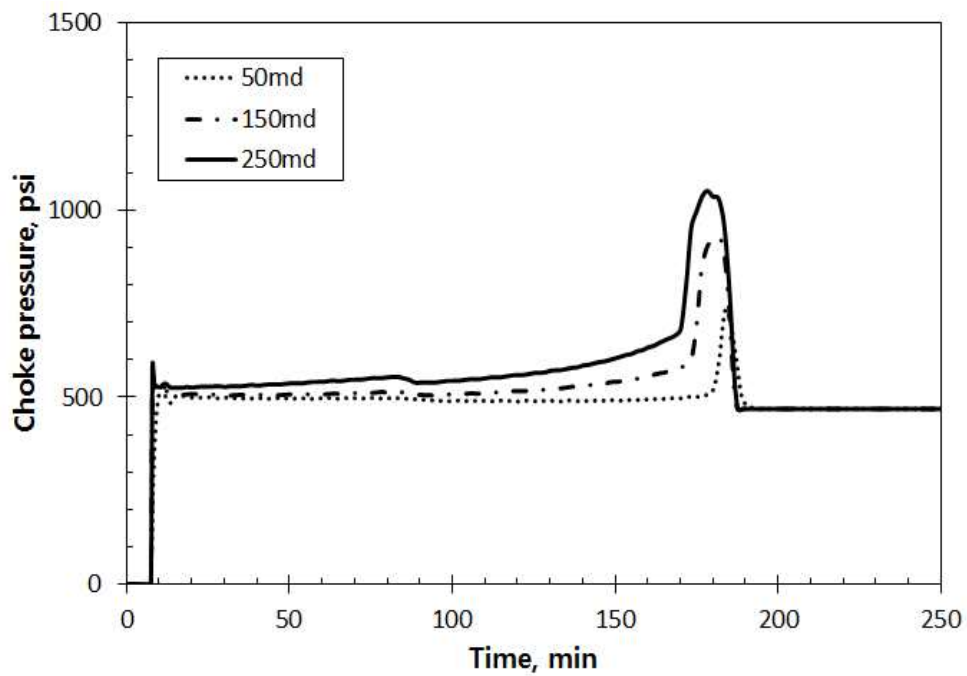


Fig. 4.9 Choke pressures for different formation permeabilities: OBM

4.5 유정제어방법별 유정제어분석

유입된 킅을 제거하는 유정제어 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 기존의 이수를 사용하여 킅을 제거하고 높은 밀도의 킬이수를 주입하여 유정을 제어하는 시추자방법과 첫 순환부터 밀도가 높은 킬이수를 주입하여 유정을 제어하는 공학자방법이 있다.

Fig. 4.10은 유정제어방법에 따른 이수부피증가를 나타낸다. 공학자방법에서는 밀도가 높은 킬이수가 가스킅 하부에서 높은 정수압을 제공하므로 시추자방법에 비해 상대적으로 킅 상부압력이 낮다. 이는 가스킅의 더 많은 부피팽창을 야기하여 시추자방법에 비해 높은 이수부피증가를 보인다.

Fig. 4.11은 유정제어방법에 따른 초크압력변화를 보여주고 있다. 공학자방법은 더 많은 가스부피팽창을 야기하지만 킬이수의 높은 밀도로 인해 더 낮은 초크의 압력으로 유정제어를 수행할 수 있다. 공학자방법에서는 지표에서 주입한 킬이수가 비트를 지나 애눌러스 구간을 채우기 시작하는 시점부터 초크압력이 낮아지다가 킅이 지표에 도달하면 급격히 높아진다. 공학자방법은 시추자방법에 비해 자유가스양이 많아 킅과 유성이수의 혼합구간의 부피가 크다. 따라서 킅이 지표에 도달한 이후 완전히 제거하는데 걸리는 시간이 더 길다는 것을 알 수 있다.

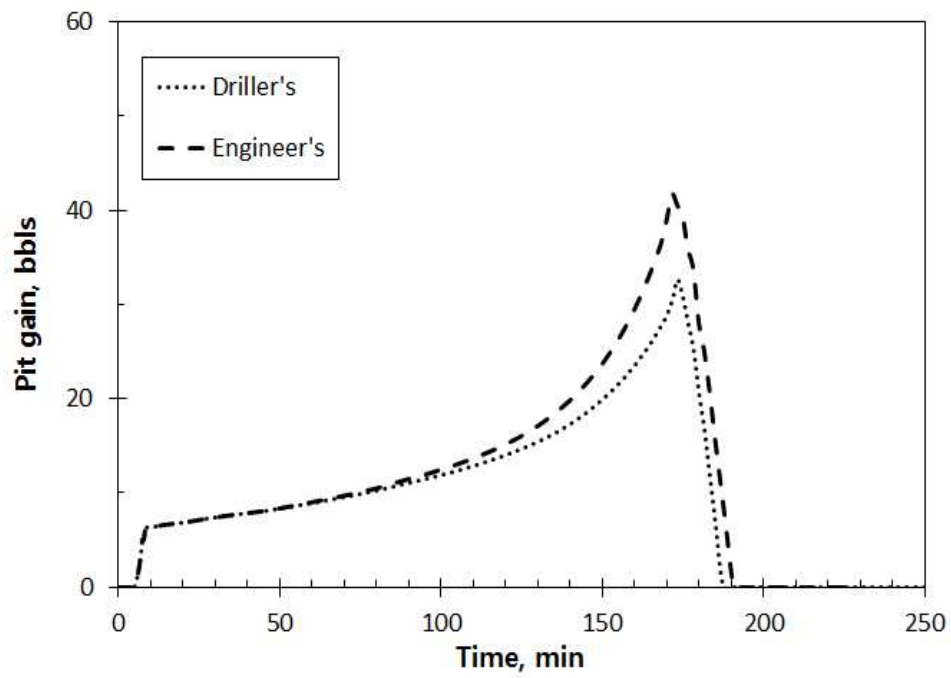


Fig. 4.10 Pit gains for driller's and engineer's methods: OBM

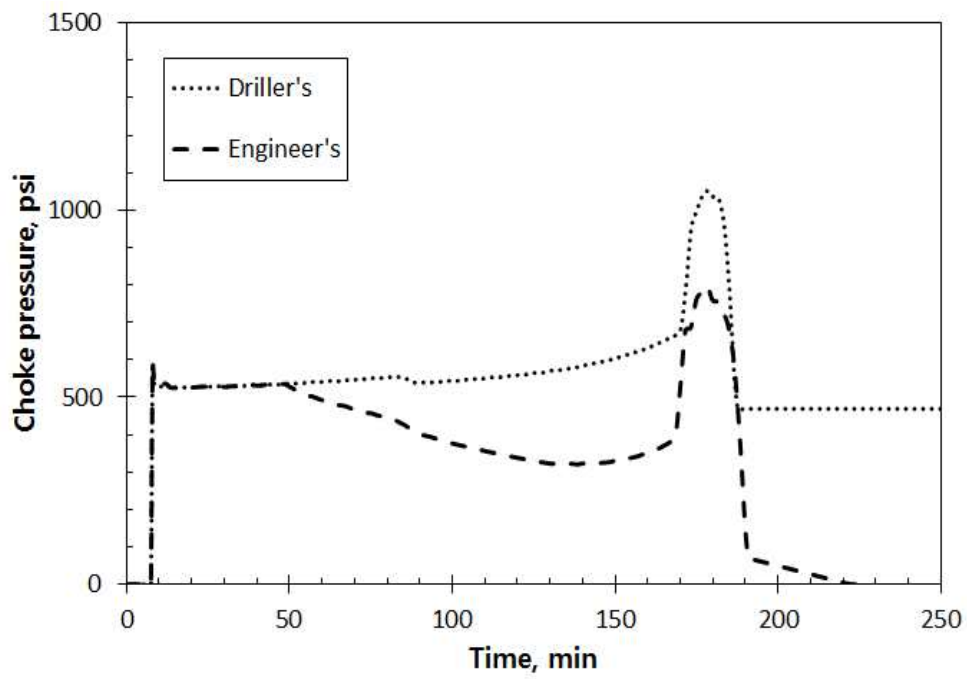


Fig. 4.11 Choke pressures for driller's and engineer's methods: OBM

4.6 열교환 고려에 따른 유정 제어분석

애널리서를 순환하는 이수온도는 지층 및 시추파이프 내 유체와의 열교환, 유체의 대류현상에 의해 지층구배에 의한 온도와는 차이가 있다. Fig. 4.12에서 볼 수 있듯이 심도가 깊을수록 순환이수의 온도는 지층구배에 의한 온도보다 낮고 지표에 가까울수록 지층구배에 의한 온도보다 높다.

Case 1은 Table 4.1에 제시된 열교환계수(시추파이프 내 유체: $30Btu/hr/ft^2/^\circ F$, 지층 내 유체: $1.0Btu/hr/ft^2/^\circ F$)를 이용한 경우 순환이수의 온도이다. Case 2는 다른 조건은 동일하고 시추파이프 내 유체와의 열교환계수를 $10Btu/hr/ft^2/^\circ F$ 로 설정한 경우이다.

Fig. 4.12를 보면 Case 2는 Case 1과 비교하여 애널리서를 순환하는 이수온도가 지층온도구배와 더 많은 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 시추파이프 내 유체와 열교환이 줄어들었기 때문이며 따라서 순환이수의 온도를 결정할 때 파이프의 특성을 고려한 정확한 열교환계수를 산출해야한다. Fig. 4.13은 순환이수의 온도가 각각 지층구배, Case 1, 2의 온도분포를 따르는 경우에 대한 이수부피증가를 나타낸다. 시추공 하부에서는 대부분의 가스가 용해되어 있으므로 온도차이에 의한 영향이 크지 않다. 지표근처에서 녹아있던 가스가 방출되면 온도차에 의해 부피팽창이 달라진다. 따라서 세가지 경우 중 지표근처의 온도가 가장 높은 Case 2에서 가장 높은 이수부피증가를 보인다.

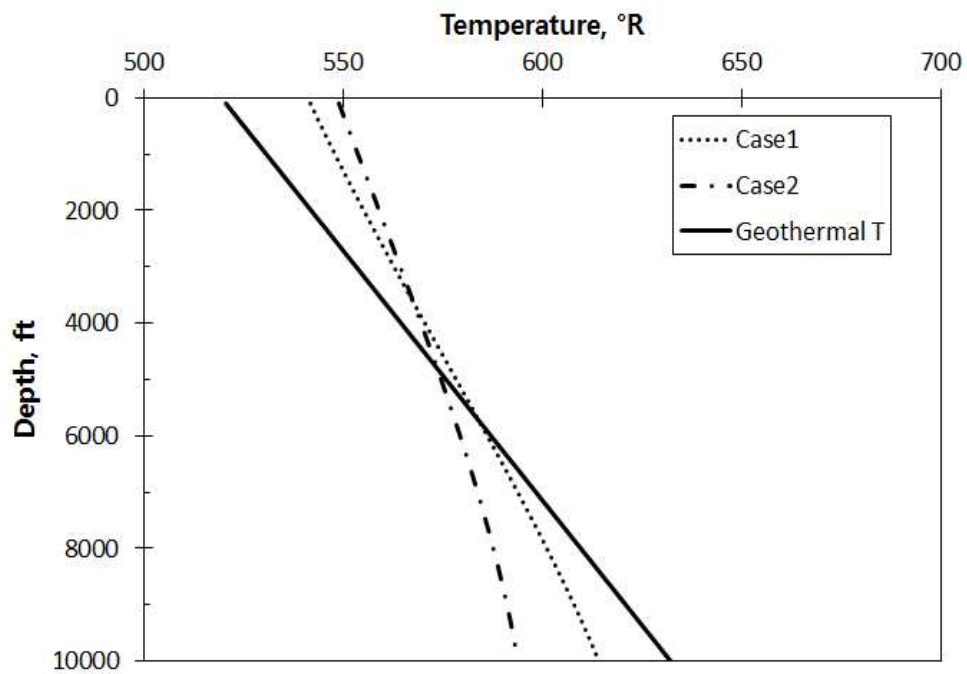


Fig. 4.12 Temperature profiles in the annulus

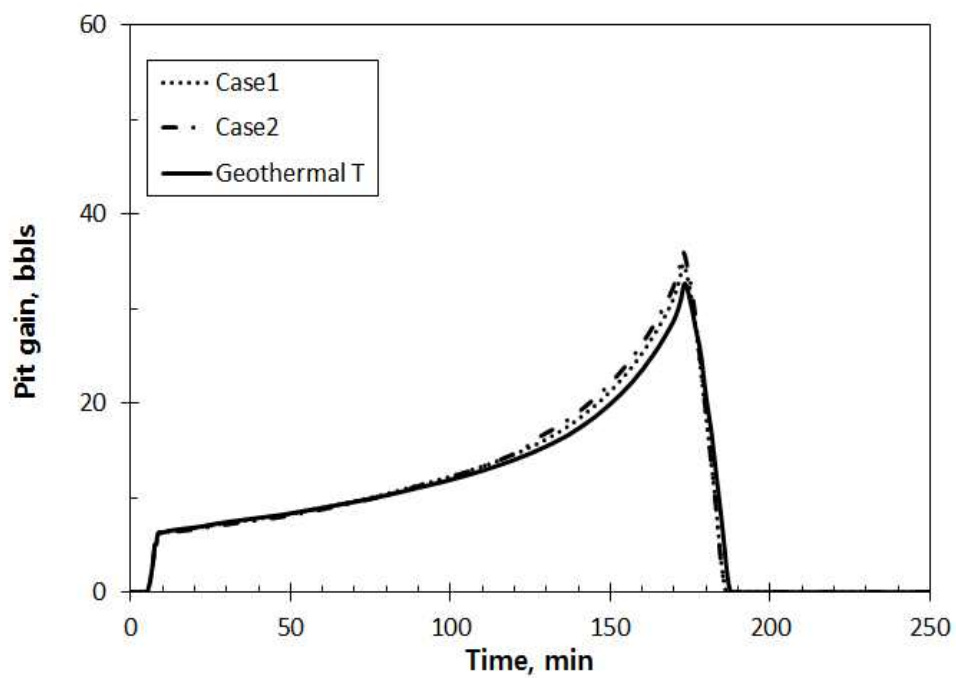


Fig. 4.13 Pit gains for different temperature profiles

4.7 기저유종류에 따른 유정제어분석

본 연구에서는 유성이수를 구성하는 대표적인 세가지 기저유(No.2 diesel, Mentor 28, Conoco LVT)를 선정하였다. 각 기저유별 조성은 Table 2.1에 나타나있다. 일반적으로 기저유를 구성하는 성분중 가벼운 탄소성분이 많을수록 가스와의 혼합성이 높아 동일조건에서 더 높은 용해도값을 가진다. Fig. 4.14는 동일한 온도에서 기저유종류에 따른 용해도변화를 나타낸 것이다. 세가지 기저유 중 가장 가벼운 Conoco LVT가 가장 용해도가 높고 가장 무거운 Mentor 28의 용해도가 가장 낮다. 이러한 용해도 차이는 압력이 높을수록 커지고 압력이 낮아지면서 점점 줄어든다.

Fig. 4.15는 기저유 종류에 따른 이수부피증가를 나타낸 것이다. 압력이 높은 시추공하부에서는 용해도가 가장 낮은 Mentor 28의 이수부피증가가 가장 높고 Conoco LVT의 이수부피증가가 가장 낮다. 하지만 킷이 지표근처로 올수록 기저유별 용해도 차이가 줄어들어 이수부피증가가 비슷한 값을 가진다.

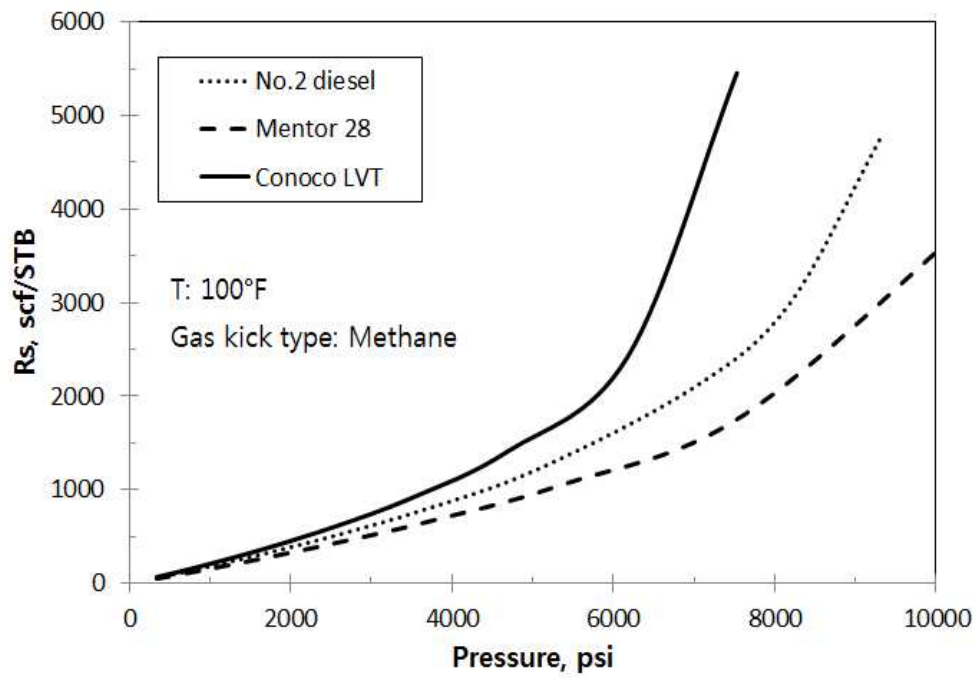


Fig. 4.14 Gas solubility curves for the different base oils

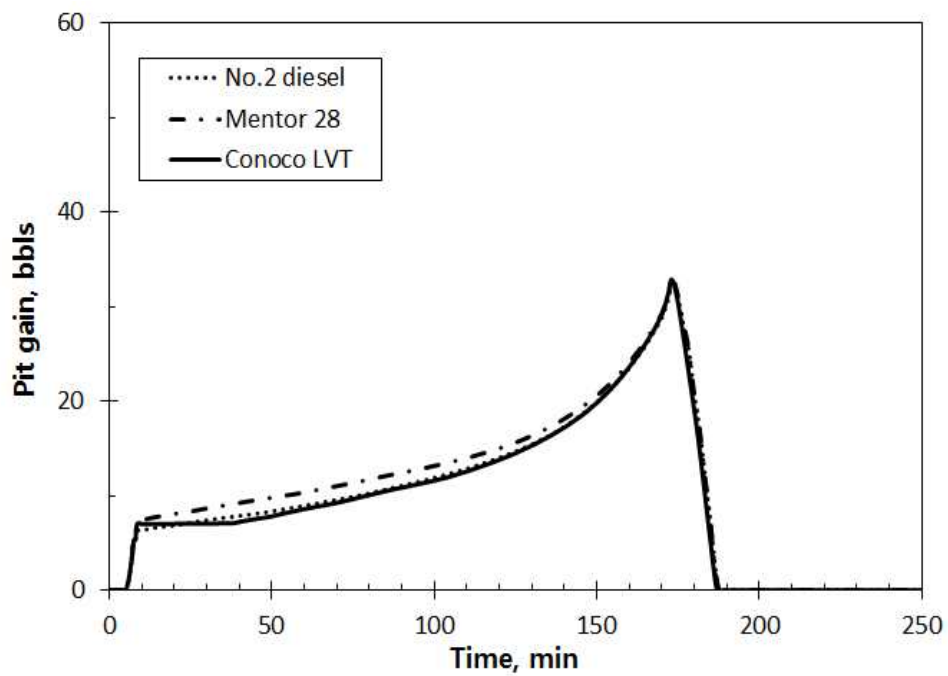


Fig. 4.15 Pit gains for the different base oils

4.8 초크조작방식에 따른 유정제어분석

팽창하는 가스킵에 의한 정수압감소를 보상해주기 위해서는 적절한 초크조절을 통해 초크압력을 가해주어야 한다. 이전까지의 분석에서는 킵이 이동할 때 시추공저의 압력이 지층압력과 같아지도록 하는 이상적인 초크압력을 수학적으로 계산하는 자동방법을 사용하였다. 하지만 실제 유정제어상황이 발생하면 초크의 개폐를 수동으로 조작하여 킵을 제거하게 된다. 따라서 사용자의 조작에 의한 초크압력을 직접계산에 반영하는 수동방법을 도입함으로써 보다 현실적인 분석이 가능하다. 이를 발전시킨다면 추후 유성이수를 이용한 교육·훈련용 시뮬레이션에 활용할 수 있다.

Fig. 4.16과 Fig. 4.17은 초크조작방식에 따른 이수부피증가와 초크압력의 변화를 보여준다. 킵을 제거하는 과정에서 사용자의 조작에 의해 이상적인 초크압력보다 높은 초크압력을 가하면 킵의 배출과 부피팽창이 제한되어 낮은 이수부피증가를 보임을 알 수 있다.

해저면에서 직경이 작은 초크라인으로 밀도가 낮은 가스킵이 유입되면 동일 부피의 킵이 큰 정수압감소를 유발하여 초크압력이 급격히 증가하게 된다. 또한 킵이 초크라인에서부터 배출될 때 가스의 부피비로 인하여 압력손실이 변화하므로 초크압력의 진동이 발생함을 알 수 있다. 이렇게 압력진동이 발생할 때 시추공저압력이 지층압력보다 낮아지면 이차킵(second-kick)이 발생할 수 있다. 특히 유성이수를 사용할 경우 이차킵이 이수속으로 용해되어 감지하기 어려우므로 주의해야 한다.

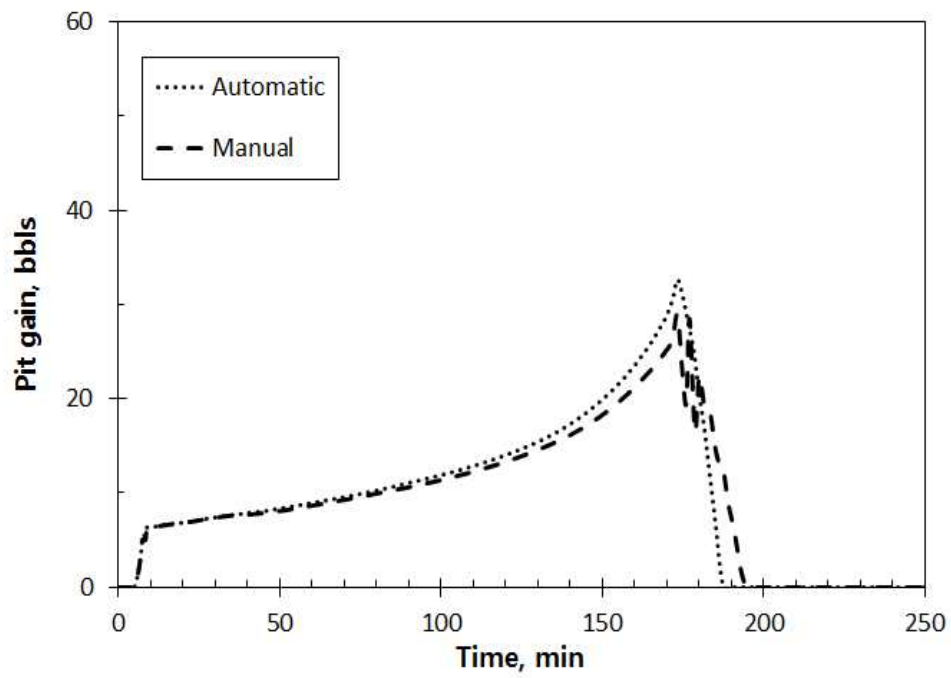


Fig. 4.16 Pit gains for automatic and manual choke control methods: OBM

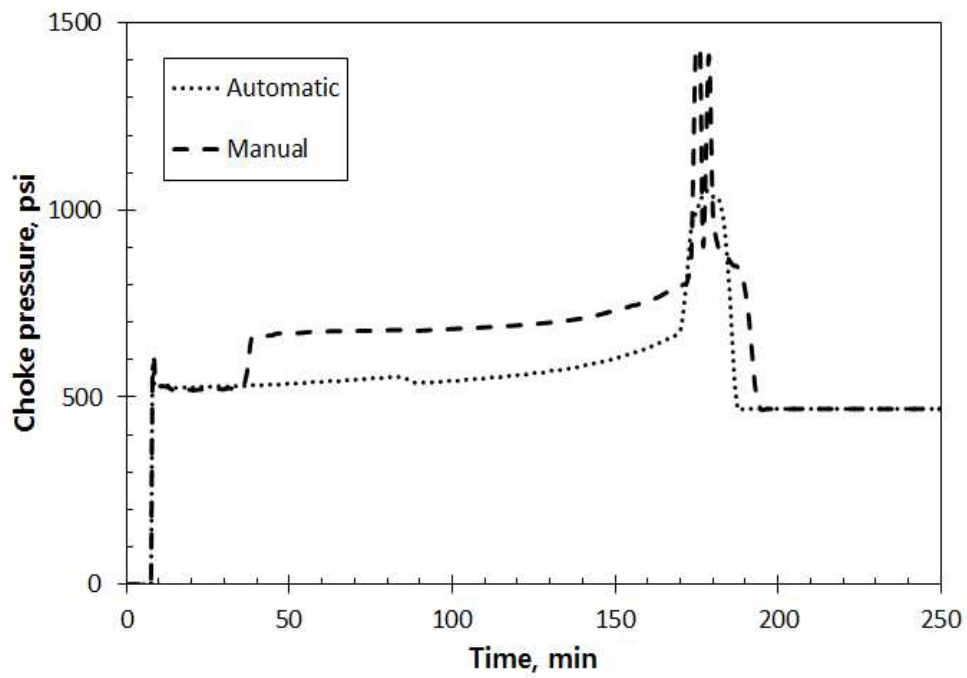


Fig. 4.17 Choke pressures for automatic and manual choke control methods:
OBM

제 5장 결론

본 연구에서는 대체이상모델을 이용한 유성이수 유정제어모델을 개발하였다. 개발된 모델을 완전이상모델을 사용하는 상용프로그램과 비교하여 정확성을 검증하였다. 이수의 종류, 시추궤도, 지층조건, 유정제어방법, 열전달 효과, 기저유종류, 초크 조작방법 등을 고려한 다양한 유정제어 상황을 분석할 수 있다.

1. 유성이수의 용해성으로 인해 이수부피증가가 수성이수를 사용한 경우보다 현저히 낮다. 따라서 동일한 시추공저압력을 유지하기 위해 요구되는 지표 초크압력이 낮으며 용해가스가 이수과 함께 유동하므로 초크압력이 최대값에 도달하는 시점이 늦다.
2. 시추궤도의 수평구간에서는 킁 상부에 가해지는 압력이 동일하므로 킁의 방출과 부피팽창이 제한된다. 따라서 유성이수에서는 시추궤도 내 수평구간이 길수록 이수부피 증가를 이용한 킁감지가 지연된다.
3. 지층의 유체투과율은 단위시간당 유입되는 가스량에 영향을 미치며 동일한 부피의 이수에 섞여있는 가스의 양이 많을수록 가스오일비를 상승시켜 더 높은 압력구간에서 가스가 빠져나온다.
4. 유성이수를 구성하는 기저유에 가벼운 탄소성분이 많을수록 가스와의 혼합성이 높아 동일조건에서 더 높은 용해도값을 가진다. 따라서 기저유의 조성은 시간에 따른 이수부피증가와 초크압력변화에 영향을 미친다.
5. 본 연구에서는 사용자의 조작에 의해 초크압력을 조절하는 수동방법을 모델링하였다. 이는 실제로 현장에서 이루어지는 유정제어방법으로 추후 유성이수를 이용한 교육·훈련용 시뮬레이션에 활용할 수 있다.

참고문헌

Adamson, K., Birch, G., Gao, E., Hand, S., Macdonald, C., Mack, D. and Quadri, A., 1998, "High-Pressure, High-Temperature Well Construction," *Oilfield Review*, Vol. 10, No. 2, pp 36-49.

Beggs, H.D. and Brill, J.P., 1973, "A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes," *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 25, No. 5, pp 607-617.

Choe, J., 2001, "Advanced Two-Phase Well Control Analysis," *Journal of Canadian petroleum Technology*, Vol. 40, No. 5, pp. 39-47.

Choe, J., 2011, *Offshore Drilling Engineering*, 1st Ed., CIR Press, Seoul, Korea, pp. 217-316.

Choe, J. and Juvkam-Wold, H.C., 1997, "A Modified Two-Phase Well Control Model and Its Computer Applications as a Training and Educational Tool," *SPE Computer Applications*, Vol. 9, No. 1, pp. 14-20.

Choe, J., Schubert, J.J., and Juvkam-Wold, H.C., 2004, "Well Control Analyses on Extended Reach and Multilateral Trajectories," *Proc. of the Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA, May 3-6.

Guntis, M., 2011, "New Synthetic-based Muds Allow More Complex Wells," *Oil & Gas Journal*, Vol. 109, No. 6, pp. 68-70.

Hamarthy, T.Z., 1960, "Velocity of Large Drops and Bubbles in Media of Infinite or Restricted Extent," *American Institute of Chemical Engineers Journal*, Vol. 6, No. 2, pp. 281-289.

- Hasan, A.R. and Kabir, C.S., 1988, "Predicting Multiphase Flow Behavior in a Deviated Well," *SPE Production Engineering*, Vol. 3, No. 4, pp. 474–482.
- Holmes, C.S. and Swift, S.C., 1970, "Calculations of Circulating Mud Temperatures," *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 22, No. 6, pp. 670–674.
- Lee, J.W., 1982, *Well Testing*, 1st Ed., SPE Textbook Series, Dallas, Texas, USA, pp. 76–85.
- Monteiro, E.N., Ribeiro, P.R., and Lomba, R.F.T., 2008, "Study of the PVT Properties of Gas-Synthetic Drilling Fluid Mixtures Applied to Well Control Operations," *Proc. of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver, Colorado, USA, Sept. 21–24.
- Nickens, H.V., 1987, "A Dynamic Computer Model of a Kicking Well," *SPE Drilling Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 159–173.
- O'Bryan, P.L. and Bourgoyne, A.T.Jr., 1988, "An Experimental Study of Gas Solubility in Oil-Based Drilling Fluids," *SPE Drilling Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 33–42.
- O'Bryan, P.L. and Bourgoyne, A.T.Jr., 1990, "Swelling of Oil-Based Drilling Fluids Resulting From Dissolved Gas," *SPE Drilling Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 149–155.
- Peng, D.Y. and Robinson, D.B., 1976, "A new Two-Constant Equation of State," *Industry and Engineering Chemistry : Fundamentals*, Vol. 15, No. 1, pp. 9–64.
- Peterson, J., Rommetveit, R., Bjorkevoll, K.S. and Froyen, J., 2008, "A General

Dynamic Model for Single and Multi-phase Flow Operations during Drilling, Completion, Well Control and Intervention,” *Proc. of the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*, Jakarta, Indonesia, Aug. 25-27.

Rommetveit, R. and Blyberg, A., 1989 “The Effect of Operating Condition, Reservoir Characteristics and Control Methods on Gas Kicks in Oil Based Drilling Muds,” *Proc. of the SPE Offshore Europe*, Aberdeen, United Kingdom, Sept. 5-8.

Silva, C.T., Mariolani, J.R.L., Bonet, E.J., Lomba, R.F.T, Santos, O.L.A. and Ribeiro, P.R., 2004, “Gas Solubility in Synthetic Fluids : A Well Control Issue,” *Proc. of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, USA, Sept. 26-29.

Sung, K.J., 2012, “Well Control Modeling for Oil Based Mud Using Peng-Robinson Equation of State,” M.S. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.

ABSTRACT

Well Control Modeling of Oil Based Muds for Various Well Trajectories

Taeyeob Lee
The Graduate School
Seoul National University

A kick is unscheduled flow of formation fluids into the wellbore. Well control includes the whole process as kick prevention, kick detection, kick control, and kick removal. In case of gas kicks in oil based mud(OBM), it is important to analyze kick behaviors accurately because volume and density of OBM are changing due to gas kick dissolution.

In this study, OBM well control model is developed using an alternative two phase model, which models two phase as layers of gas-mud mixture. Various well control situations are considered such as mud types, well trajectories, formation conditions, well control methods, thermal effects of mud, base oil types, and choke control methods.

The gas kick goes into solution in OBM resulting in small initial pit gain and late kick detection when the same amount of gas kick occurs. These effects become remarkable as horizontal sections of well trajectories are long. High formation permeability causes large amount of gas influx and consequently the dissolved gas is released at deeper wellbore section during kick circulating out. More lighter components in the base oil cause higher gas solubility, therefore pit gains with time are different according to base oil compositions. In addition, automatic and manual choke controls are considered in this study. Using the manual control, it helps to understand realistic kick behavior in the wellbore and could be applied to an educational-training well control system.

Keywords: well control, oil based mud, kick, well trajectories, gas kick solubility

Student number: 2011-23426